

SISTEMA IoT PARA SUPERVISAR LA CALIDAD EN CAUDALES  
SUPERFICIALES, A PARTIR DE LA NORMATIVIDAD AMBIENTAL

JULIÁN ANDRÉS AVENDAÑO LEÓN



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE POSGRADOS  
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA INFORMÁTICA  
TUNJA, BOYACÁ  
2019

SISTEMA IoT PARA SUPERVISAR LA CALIDAD EN CAUDALES  
SUPERFICIALES, A PARTIR DE LA NORMATIVIDAD AMBIENTAL

JULIÁN ANDRÉS AVENDAÑO LEÓN

Trabajo de grado para optar al título de Magister en Tecnología Informática

Director:

MIGUEL ANGEL MENDOZA MORENO

Ingeniero de Sistemas y Computación  
MSc. Ciencias de la Información y las Comunicaciones  
Ph.D. Ciencias de la Electrónica

Codirectora:

DIANA LISETH ANGARITA LOZANO

Ingeniera Civil  
Mág. Gestión Ambiental



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE POSGRADOS  
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA INFORMÁTICA  
TUNJA, BOYACÁ  
2019

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

Firma del Presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Tunja 01, marzo, 2019

A Dios, a mi Madre, a mi Padre y a mi Hermana, por su cariño, comprensión y apoyo incondicional.

## Agradecimientos

Al Ingeniero Miguel Angel Mendoza Moreno y a la Ingeniera Diana Liseth Angarita Lozano, por la dirección, asesoría y acompañamiento durante todo el trabajo.

A Diego Alexander Sosa Suárez, por su aporte y colaboración para la realización del proyecto.

## CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN .....	17
RESUMEN DE LA INVESTIGACIÓN.....	18
1. OBJETO DE ESTUDIO .....	20
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	20
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	22
1.3. JUSTIFICACIÓN .....	22
1.4. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	25
1.4.1 Hipótesis .....	25
1.4.2 Objetivo General .....	25
1.4.3 Objetivos Específicos .....	25
1.5. METODOLOGÍA .....	25
2. MARCO REFERENCIAL.....	29
2.1. MARCO CONCEPTUAL .....	29
2.2. MARCO TEÓRICO.....	35
2.2.1 Consideraciones generales sobre el recurso hídrico. ....	36
2.2.2 Rellenos sanitarios. ....	38
2.2.3 Internet de las Cosas (IoT). ....	39
2.3. MARCO LEGAL .....	39
2.3.1 Decreto 838 de 23 de marzo de 2005. ....	40
2.3.2 Resolución 1274 del 30 de junio de 2006. ....	40
2.3.3 Decreto 1575 del 09 de mayo de 2017. ....	41
2.3.4 Resolución 2115 de 22 de junio de 2007. ....	42
2.3.5 Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. ...	43
2.4. ESTADO DE ARTE .....	44
3. SOLUCIÓN TECNOLÓGICA .....	54
3.1. METODOLOGÍA PARA SELECCIÓN DEL ESTUDIO DE CASO .....	54
3.2. CARACTERIZACIÓN DEL ESTUDIO DE CASO .....	55
3.3. PROTOCOLO DE MUESTREO .....	59

3.3.1 Justificación para Establecer un Programa de Monitoreo. ....	59
3.3.2 Requerimientos para la Implementación de la Solución Tecnológica. ....	60
3.3.3 Determinación de Objetivos del Monitoreo en la Quebrada “Las Cebollas”. .	60
3.3.4 Consideraciones para el despliegue de la solución de monitoreo.....	61
3.3.5 Factores sobre la ubicación de estaciones de monitoreo.....	61
3.3.6 Puntos de Muestreo. ....	61
3.3.7 Selección del Tipo de Muestreo. ....	62
3.3.8 Parámetros de Elección de Muestreo Automático. ....	62
3.3.9 Selección de Tipo de Muestra y Frecuencia de Muestreo.....	63
3.3.10 Consideraciones para la Medición en Campo. ....	64
3.3.11 Procedimiento y Protocolo para Toma de Muestras.....	64
3.4. DISEÑO TECNOLÓGICO .....	65
3.4.1 Ubicación Geográfica de las Estaciones de Monitoreo. ....	65
3.4.2 Estructura de las Estaciones de Monitoreo. ....	66
3.4.3 Variables Susceptibles de Medición en Campo para el Estudio de Caso. ....	67
3.4.4 Dispositivos de Medición y Circuitos para Acondicionamiento de Señal. ....	68
3.4.5 Circuitos y Plataformas para Adquisición de Datos.....	71
3.4.6 Configuración de Microcontrolador y Acondicionamiento de Señal. ....	73
3.4.7 Configuración del Circuito de Acondicionamiento pH EZO™.....	75
3.4.8 Configuración del Circuito de Acondicionamiento D.O. EZO™.....	76
3.4.9 Configuración del Circuito de Acondicionamiento E.C. EZO™. ....	77
3.4.10 Conexión I <sup>2</sup> C entre Circuitos de Acondicionamiento y Microcontrolador.....	77
3.4.11 Diseño Lógico del Sistema.....	79
3.4.12 Instalaciones de las Estaciones de Monitoreo en Campo. ....	105
3.5. PARÁMETROS DE CALIDAD SEGÚN NORMATIVIDAD.....	106
3.5.1. Estados Permitidos para pH.....	107
3.5.2. Estados Permitidos para Conductividad Eléctrica.....	108
3.5.3. Estados Permitidos para Oxígeno Disuelto.....	108
3.5.4 Estados Permitidos para Otras Variables. ....	109
4. RESULTADOS OBTENIDOS.....	112
5. CONCLUSIONES .....	140

6. FUENTES DE INFORMACIÓN .....	143
7. ANEXOS .....	147



## LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Frecuencia para monitoreo de variables en acuíferos .....	21
Tabla 2. Aspectos considerados para el desarrollo de la solución tecnológica .....	24
Tabla 3. Variables e indicadores para la evaluación de la investigación .....	27
Tabla 4. Desarrollo metodológico para la etapa 1.....	27
Tabla 5. Desarrollo metodológico para la etapa 2.....	28
Tabla 6. Desarrollo metodológico para la etapa 3.....	28
Tabla 7. Desarrollo metodológico para la etapa 4.....	28
Tabla 8. Desarrollo metodológico para la etapa 5.....	28
Tabla 9. Factores que afectan la calidad del agua.....	30
Tabla 10. Frecuencia de monitoreo en afluentes superficiales .....	32
Tabla 11. Rangos óptimos para pH en el agua según su uso final.....	34
Tabla 12. Parámetros normativos para las características físicas del agua .....	43
Tabla 13. Selección del caso para el desarrollo del trabajo.....	54
Tabla 14. Registro de caracterización de la Quebrada “Las Cebollas” .....	57
Tabla 15. Métodos de medición para variables de calidad del recurso hídrico .....	67
Tabla 16. Instrumentos para medición de pH .....	68
Tabla 17. Instrumentos para medición de conductividad eléctrica.....	70
Tabla 18. Instrumentos para medición de oxígeno disuelto.....	71
Tabla 19. Comparación de plataformas para el desarrollo de aplicaciones IoT.....	71
Tabla 20. Comparación de tipos de redes inalámbricas para monitoreo .....	73
Tabla 21. Configuración del circuito pH EZO™ .....	75
Tabla 28. Configuración del circuito D.O. EZO™ .....	76
Tabla 31. Lectura de características y configuración del circuito D.O. EZO™ .....	77
Tabla 33. Direcciones I <sup>2</sup> C para circuitos de acondicionamiento .....	78
Tabla 25. Verificación de lectura y direcciones I <sup>2</sup> C para circuitos EZO™ .....	79
Tabla 26. Descripción de la aplicación: Estaciones de monitoreo .....	81
Tabla 27. Parámetros de configuración para Gateway MultiTech.....	82

Tabla 28. Parámetros de configuración de red para el dispositivo LoPy 1 .....	83
Tabla 29. Parámetros de configuración de red para el dispositivo LoPy 2 .....	83
Tabla 30. Parámetros de configuración de red para el dispositivo LoPy 3 .....	83
Tabla 31. Comando para obtener la dirección LoPy MAC .....	84
Tabla 32. Parámetros de la aplicación “app-calidad-agua” en TTN .....	85
Tabla 33. Registro de dispositivos LoPy en plataforma TTN .....	86
Tabla 34. Registro del Gateway MultiTech en plataforma TTN .....	88
Tabla 35. Configuración LoRa® para el Gateway MultiTech en TTN .....	90
Tabla 36. Registro de dispositivos LoPy en Cayenne myDevices .....	92
Tabla 37. Asignación de variables análogas en Cayenne .....	93
Tabla 38. Bloques de programación Node-RED .....	96
Tabla 39. Configuración de función ttn uplink por estación.....	100
Tabla 40. Lectura de variables análogas a través de “function node” .....	101
Tabla 41. Configuración de función gauge para pH.....	102
Tabla 42. Estados permitidos para pH según normatividad.....	107
Tabla 43. Estados permitidos de conductividad eléctrica según normatividad ....	108
Tabla 44. Estados permitidos para oxígeno disuelto según normatividad .....	109
Tabla 45. Estados permitidos normativamente para otras variables.....	109
Tabla 46. Variables e instrumentos de medición seleccionados.....	113
Tabla 47. Plataformas IoT seleccionadas .....	113
Tabla 48. Configuración de intervalos para consulta de información.....	118
Tabla 49. Condiciones del sistema para generación de alertas.....	124
Tabla 50. Alertas disponibles dentro del sistema de monitoreo .....	126
Tabla 51. Canales y sensores equivalentes en plataforma Cayenne .....	127
Tabla 52. Datos de estaciones de monitoreo “Prueba 1” .....	133
Tabla 53. Datos de estaciones de monitoreo “Prueba 2” .....	133
Tabla 54. Datos de estaciones de monitoreo “Prueba 3” .....	133
Tabla 64. Datos de estaciones de monitoreo “Prueba 4” .....	134
Tabla 56. Actividades de socialización de resultados .....	138

## LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Etapas de desarrollo del proyecto .....	27
Figura 2. Ubicación geográfica del estudio de caso.....	56
Figura 3. Registro y caracterización de la Quebrada “Las Cebollas” .....	56
Figura 4. Ubicación de las estaciones de monitoreo.....	58
Figura 5. Diagrama de la solución tecnológica implementada .....	65
Figura 6. Estructura de las estaciones de monitoreo .....	66
Figura 7. Ventana de actualización en la herramienta Pycom Upgrade .....	74
Figura 8. Comunicación serial para configuración I <sup>2</sup> C de circuitos EZO™ .....	75
Figura 9. Rango de valores de pH y puntos de calibración.....	76
Figura 10. Conexión de circuitos EZO™ y microcontrolador LoPy .....	78
Figura 11. Conexión de dispositivos para las estaciones de monitoreo.....	79
Figura 12. Estructura física y lógica de las estaciones de monitoreo.....	80
Figura 13. Tipo de señal según las etapas del sistema de medición .....	81
Figura 14. Esquema de la red y direcciones IPv4.....	84
Figura 15. Vista general de la aplicación: app-calidad-agua en TTN.....	85
Figura 16. Relación de dispositivos LoPy en la aplicación: app-calidad-agua .....	86
Figura 17. Evidencia de registro de dispositivo LoPy en plataforma TTN.....	87
Figura 18. Registro de Gateway MultiTech en plataforma TTN .....	87
Figura 19. Adquisición de variables en la estación A en plataforma TTN .....	89
Figura 20. Adquisición de variables en la estación B en plataforma TTN .....	89
Figura 21. Adquisición de variables en la estación C en plataforma TTN.....	90
Figura 22. Configuración LoRa® para Gateway MultiTech en TTN.....	91
Figura 23. Tráfico de datos a través del Gateway MultiTech en TTN .....	91
Figura 24. Integración de la aplicación TTN con Cayenne .....	92
Figura 25. Integración app-calidad-agua TTN con Cayenne .....	92
Figura 26. Estaciones de monitoreo A, B y C en Cayenne myDevices.....	93
Figura 27. Estación de monitoreo A en Cayenne myDevices .....	94

Figura 28. Estación de monitoreo B en Cayenne myDevices .....	94
Figura 29. Estación de monitoreo C en Cayenne myDevices .....	94
Figura 30. Registro de Monitoreo de pH en Cayenne myDevices .....	95
Figura 31. Registro de monitoreo de oxígeno disuelto en Cayenne myDevices ....	95
Figura 32. Integración app-calidad-agua con Estaciones en Node-RED .....	97
Figura 33. Diagrama de flujo: Estaciones en Node-RED .....	98
Figura 34. Descripción del diagrama de flujo de Estaciones .....	99
Figura 35. Configuración de ttn uplink para Estación A .....	100
Figura 36. Configuración de bloque gauge para visualización de pH .....	102
Figura 37. Visualización del valor de pH en la Estación A .....	103
Figura 38. Configuración de bloque chart para visualización de pH .....	103
Figura 39. Gráfica del valor de pH en la Estación A respecto al tiempo .....	104
Figura 47. Variable pH en las estaciones de monitoreo A, B y C .....	104
Figura 41. Variable oxígeno disuelto en las estaciones de monitoreo A, B y C ...	105
Figura 42. Estaciones de monitoreo ubicadas en terreno .....	105
Figura 43. Estaciones de monitoreo A, B y C, ubicadas en terreno .....	106
Figura 44. Selección de información de estaciones de monitoreo en plataforma	115
Figura 45. Selección de información de sensores en plataforma .....	116
Figura 46. Panel de monitoreo parámetro de calidad: pH .....	116
Figura 47. Panel de monitoreo parámetro de calidad: conductividad eléctrica ....	117
Figura 48. Panel de monitoreo parámetro de calidad: oxígeno disuelto .....	117
Figura 49. Gráfica de pH en estación de monitoreo A .....	118
Figura 50. Gráfica de conductividad eléctrica en estación de monitoreo A .....	119
Figura 51. Gráfica de oxígeno disuelto en estación de monitoreo B .....	119
Figura 52. Gráfica de oxígeno disuelto en estación de monitoreo C .....	120
Figura 53. Alertas para mediciones de parámetros de calidad del agua .....	126
Figura 54. Configuración de alertas en plataforma Cayenne myDevices .....	127
Figura 55. Ejemplo de notificación sobre concentración de oxígeno disuelto .....	128
Figura 56. Ejemplo de notificación de valor de pH (acidez) .....	128
Figura 57. Ejemplo de notificación de valor de pH (alcalinidad) .....	129
Figura 58. Notificaciones recibidas vía SMS desde plataforma Cayenne .....	129

Figura 59. Registro de datos en plataforma Cayenne myDevices .....	130
Figura 60. Modelo de solución desplegada según el esquema de IoT .....	132
Figura 68. Carpetas de configuración de la interfaz del proyecto .....	135
Figura 62. Vista de inicio de la interfaz de monitoreo desarrollada.....	136
Figura 63. Ventana de despliegue de información en tiempo real .....	137
Figura 64. Comportamiento y valores promedio de pH.....	137
Figura 65. Comportamiento y valores promedio de oxígeno disuelto .....	138
Figura 66. Comportamiento y valores promedio de conductividad eléctrica .....	138

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Protocolo de calibración para el circuito pH EZO™ .....	148
Anexo 2. Protocolo de calibración para el circuito D.O. EZO™ .....	151
Anexo 3. Protocolo de calibración para el circuito E.C. EZO™ .....	153
Anexo 4. Poster XXII JORNADA DE LA INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN .....	155
Anexo 5. Certificado XXII JORNADA DE LA INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN..	156
Anexo 6. Certificado SIGMAH 2018.....	157
Anexo 7. Soportes de socialización “ServiTunja S.A. E.S.P.” y “Corpoboyacá” ..	158

## GLOSARIO

API: conjunto de conjunto de funciones, métodos, y subrutinas de programación para el desarrollo de software y aplicaciones.

Calidad del agua: conjunto de parámetros, que determinan la idoneidad a idoneidad para el uso del agua para el consumo humano, aplicaciones de agricultura, crianza de peces, industria de alimentos, entre otros, alrededor de este concepto se enmarcan estándares que buscan la protección de la salud pública y del recurso hídrico y ambiente acuático.

Cayenne: Cayenne MyDevices, es una plataforma para el desarrollo y gestión de aplicaciones IoT, que permite la administración y registros de aplicaciones y para despliegue de aplicaciones a partir de informacion suministrada por sensores y plataforma de desarrollo IoT.

Cloud store: especificación y modelo de almacenamiento de datos a través de servicios de computación en la nube, interfaces de programación de aplicaciones y servicios web.

Conductividad eléctrica: variable inversa a la resistencia eléctrica, su unidad de medición es el Siemens ( $\Omega$ ), e indica la propiedad de los líquidos (en particular del agua) de contener sales y solidos disueltos que hacen posible la conducción de corriente eléctrica.

Gateway: dispositivo de red, denominado en español como puerta de enlace, y cumple la función de equipo para la interconexión de redes y equipos.

Gestión ambiental: conjunto de procedimientos, protocolos y parámetros normativos, que tiene como finalidad la promover el uso racional, la protección y conservación de los recursos naturales y el ambiente.

IoT: sigla del concepto Internet de las Cosas (Internet of Things), hace referencia a la interconexión a través de protocolos de comunicación de objetos, equipos y dispositivos electrónicos a internet.

LoPy: microcontrolador y plataforma para desarrollo de aplicaciones de IoT, compatible con especificaciones WiFi, Bluetooth y LoRa, se programa bajo un entorno de desarrollo de MicroPython.

LoRa: protocolos de especificación de redes de interconexión de dispositivos de bajo consumo de potencia para aplicaciones de configuración de redes de área amplia.

Oxígeno disuelto: medición del volumen de oxígeno contenido en el agua.

pH: medición del potencial de hidrógeno, indica la actividad de iones de hidrogeno ( $H^+$ ) en una solución y permite cuantificar el grado de acidez o alcalinidad en una solución química.

Sistema de Información Geográfica: herramientas de hardware, software, y aplicaciones de usuario, para organizar, almacenar, analizar y modelar información espacial, datos, mapas y resultados.

TTN: The Things Network, plataforma para la configuración de redes y aplicaciones IoT, a través de herramientas de red para gestión de aplicaciones IoT de bajo costo.



## INTRODUCCIÓN

En la vereda de Pirgua, de la zona central del departamento de Boyacá, se encuentra ubicado el relleno sanitario del mismo nombre, el cual es receptor de los residuos de diferentes municipios de Boyacá y Santander. Este relleno sanitario es operado por la empresa ServiTunja.

Por el costado oriental del relleno sanitario transcurre la quebrada “Las Cebollas”, que reviste una especial importancia para la región, toda vez que provee de agua potable al municipio de Oicatá y en su trazado, algunos propietarios de predios aledaños se sirven de su agua para labores como la ganadería y en casos excepcionales para el riego, lo que suscita diferentes situaciones de índole ambiental, de forma que pasa a ser de la jurisdicción de Corpoboyacá en calidad de autoridad ambiental.

La historia del relleno sanitario va acompañada de las interacciones con la comunidad aledaña, quienes en determinados momentos han presentado querellas respecto a la presencia de vectores en sus predios, afectaciones sobre su humanidad e incluso sobre el torrente que transcurre en la quebrada “Las Cebollas”. Esta situación enmarca una alerta tanto para la autoridad ambiental como para el operador del relleno, quienes por ley deben realizar mediciones de la calidad del agua del afluente con una frecuencia bianual. No obstante, ante lo expuesto por los pobladores, la importancia de la calidad del agua para el consumo por parte del municipio de Oicatá y la dinámica operativa del relleno sanitario, resulta deseable incrementar el muestreo y la inmediatez de los resultados en el monitoreo de la calidad del agua de la citada quebrada.

De esta manera, se evidencia que es posible generar una investigación aplicada conducente a una implementación tecnológica basada en el paradigma de Internet de las Cosas (Internet of Things- IoT), para suplir la necesidad expuesta y promover acciones eficientes, tendientes a que tanto autoridad ambiental como el operador del relleno sanitario, cuenten con información pertinente que les permita ejecutar acciones eficientes en favor de los pobladores, el entorno y sus intereses misionales.

## RESUMEN DE LA INVESTIGACIÓN

Parte del agua potable para el abastecimiento del acueducto del municipio de Oicatá, proviene de la quebrada “Las Cebollas”, y en el curso de la misma se encuentra el área de influencia del Relleno Sanitario de Pírgua, a menudo los habitantes de la región informan tanto a la autoridad Ambiental como al operador del Relleno Sanitario sobre presuntos impactos negativos de tal Relleno Sanitario sobre ellos, sus bienes (animales y plantas) y el cauce en las fuentes hídricas circundantes. Por lo anterior, el operador del relleno sanitario y la autoridad ambiental, ameritan robustecer sus acciones de monitoreo y control de los parámetros de calidad del agua de las fuentes superficiales; actualmente, las variables se monitorean a través de muestreo in situ y procedimientos de análisis in vitro. A partir de lo expuesto, se evidenció la necesidad de generar informes y planificar actividades de control para mitigar los posibles impactos negativos del relleno sanitario sobre el agua de la mencionada fuente hídrica. Desde el marco de la tecnología informática (TI), fue posible diseñar y construir una propuesta de solución tecnológica basada en el paradigma de Internet de la Cosas (IoT), que permitió generar actividades de monitoreo y reporte en tiempo real sobre los parámetros de calidad del agua de la quebrada, de forma específica, los valores de pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, lo que posibilita que la autoridad ambiental y el operador del relleno sanitario, tengan la posibilidad de desplegar acciones proactivas en favor de la quebrada las Cebollas, la zona circundante al Relleno Sanitario y desde luego, los pobladores del sector, por medio de un sistema de reporte de datos en tiempo real del estado de la citada quebrada.

El desarrollo del trabajo, se justificó tomando en cuenta la necesidad del operador del relleno sanitario de Pírgua y la autoridad ambiental del departamento de Boyacá, para contar con una herramienta para el monitoreo los parámetros de estimación de la calidad del agua de acuerdo con las normas de regulación ambiental aplicables, que especifican las variables que deben ser monitoreadas, a saber: pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, metales pesados, DQO (Demanda Química de Oxígeno) y las concentraciones de: amoníaco, nitritos y nitratos, para lo que el avance investigativo permitió conceptualizar la disponibilidad de sensores debidamente certificados y con un grado satisfactorio de confiabilidad para las tres primeras variables, constituyendo así el estudio de caso.

El sistema desarrollado y el prototipo incluyen tres puntos de monitoreo, el primero (A), ubicado aguas arriba antes del área de influencia del relleno sanitario Pírgua sobre la quebrada “Las Cebollas”, el segundo punto de control (B), se ubicó en las coordenadas correspondientes al área de influencia del relleno sanitario sobre el afluente de la quebrada “Las Cebollas”, el tercer punto de control (C) se ubicó aguas abajo después del área de influencia del relleno pírgua sobre la quebrada, lo que evidentemente aporta a un concepto objetivo respecto a las características de la fuente hídrica en los tres momentos deseables para proyectar las observaciones técnicas.

Cada punto de monitoreo incluye sondas para la medición de las variables de pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, las cuales están interconectadas a través de una red inalámbrica construida a partir de dispositivos Pycom de bajo consumo de energía, y bajo el esquema de arquitectura de red de área amplia y baja potencia (LPWAN) para la construcción de una alternativa de solución IoT, la cual permite el monitoreo en tiempo real, que de ser adoptada como instrumento de trabajo por parte de la autoridad ambiental y el operador del relleno sanitario, podría convertirse en una herramienta para la planeación de acciones de control orientadas a mitigar los posibles impactos negativos del relleno sanitario, sobre el cauce de la quebrada “Las Cebollas”.

Al término se conceptúa respecto a la eficiencia del sistema desarrollado, toda vez que se disponen los datos en tiempo real en un esquema cloud y con la implementación de módulos de despliegue y georreferenciación, se provee riqueza a la información obtenida, para que sea empleada discrecionalmente por la autoridad ambiental, los operadores del relleno sanitario, e incluso desplegable en diferentes estaciones de monitoreo, para quienes puedan considerarse interesados.

## 1. OBJETO DE ESTUDIO

El presente capítulo da a conocer los aspectos relacionados con el contexto del problema de investigación, entre ellos el planteamiento del problema, la formulación de la pregunta, justificación, hipótesis, objetivos y metodología.

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La quebrada “Las Cebollas”, es una de las fuentes de agua que junto con las quebradas “La Mecha” y “Pozo profundo”, suministran parte del agua potable para el acueducto de las zonas urbana y rural del municipio de Oicatá del departamento de Boyacá, la quebrada “Las Cebollas” se encuentra ubicada en la vereda de Pírgua de la ciudad de Tunja, y colinda con la zona de influencia donde se encuentra ubicado el Relleno Sanitario de Pírgua, lugar donde se lleva a cabo la disposición final de los residuos sólidos generados por la ciudad de Tunja y algunos municipios de los departamentos de Boyacá y Santander, en la actualidad el operador de este relleno sanitario es la empresa ServiTunja S.A. E.S.P.

La mayor parte del agua suministrada al municipio de Oicatá, es transportada por gravedad y bombeo, cerca de la zona urbana del municipio de Oicatá, la infraestructura del acueducto cuenta con: sistema para drenado, tanque de almacenamiento y estación de bombeo; debido a que en su recorrido, el cauce de la quebrada Las Cebollas, coincide con la zona de influencia del relleno sanitario de la vereda de Pírgua; por lo anterior, la población de la zona rural ha realizado reclamaciones ante los entes territoriales y de control ambiental, argumentando la presunta afectación del recurso hídrico de la quebrada, debido a la operación del relleno sanitario.

El 23 de marzo del año 2005, se promulgo el decreto 838<sup>1</sup>, según el cual se establecen los parámetros legales para la identificación y selección de zonas para la construcción y localización de rellenos sanitarios para la disposición final de residuos sólidos; el decreto contempla aspectos técnicos desde la planeación, construcción y operación de rellenos sanitarios, hasta las consideraciones ambientales a tener en cuenta durante la operación de los mismos; en el artículo 11 del capítulo II, se definen las medidas de control y monitoreo de las zonas de disposición final de residuos sólidos, haciendo referencia a los mismos como: “Control y monitoreo de la calidad del recurso agua, como mínimo, de acuerdo con los siguientes parámetros y frecuencia, sin perjuicio de lo que disponga la autoridad ambiental”<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 838 (23, marzo, 2005). Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2005. no. 45862. p. 1-15.

<sup>2</sup> *Ibíd.*, p. 12.

El artículo mencionado, define los parámetros y frecuencias mínimas para el monitoreo de variables en acuíferos cercanos a los rellenos sanitarios, a partir de este aspecto se identificó la necesidad monitorear las variables a partir de las cuales se determina la calidad del agua en zonas cercanas a rellenos sanitarios; las variables en cuestión son: pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, concentración de metales pesados, DQO (Demanda Química de Oxígeno), y las concentraciones de: amoníaco, nitritos y nitratos; la siguiente tabla, presenta la frecuencia de monitoreo mínima para cada una de las variables mencionadas, según la cantidad de residuos sólidos dispuestos en el relleno por día.

Tabla 1. Frecuencia para monitoreo de variables en acuíferos

VARIABLE	FRECUENCIA DE MONITOREO	
	Menor o igual a 15 TM/día	Mayor a 15 TM/día
pH	Anual	Semestral
Conductividad eléctrica	Bianual	Anual
Oxígeno disuelto	Anual	Semestral
Metales pesados	Anual	Semestral
DQO	Anual	Semestral
Amoníaco	Bianual	Anual
Nitritos	Anual	Semestral
Nitratos	Bianual	Anual

Fuente: Decreto 838 de 23 de marzo de 2005<sup>3</sup>

Dentro de la normatividad para manejo y operación de rellenos sanitarios, se encuentra la resolución 1274 de 2006<sup>4</sup>, que define los términos de referencia para la elaboración de estudios de impacto ambiental para la construcción y operación de rellenos sanitarios; el título 7 de la resolución 1274 del 30 de junio de 2006, establece los parámetros a considerar dentro de los planes de manejo ambiental (PMA), en lo referente a la construcción y operación de rellenos sanitarios, y que a su vez deben ser coherentes con los estudios de impacto ambiental (EIA) de la operación de los rellenos sanitarios<sup>5</sup>.

El título 7 de la resolución 1274, hace referencia a la protección de aguas subterráneas y superficiales (7.2.4. y 7.2.5), de acuerdo con las especificaciones técnicas consignadas en los títulos E y F del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000)<sup>6</sup>.

El título 8 de la resolución 1274 de 2006<sup>7</sup>, hace referencia a los planes de seguimiento y monitoreo para verificar el cumplimiento de los estándares de calidad

<sup>3</sup> Ibid., p. 12.

<sup>4</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 1274 (30, junio, 2006). Por la cual se acogen los términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental para la construcción y operación de rellenos sanitarios y se adoptan otras determinaciones. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2006. no. 46376. p. 1-26.

<sup>5</sup> Ibid., p. 21.

<sup>6</sup> MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. REPÚBLICA DE COLOMBIA. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. RAS. Bogotá, D.C.: El Ministerio, 2017. 182 p.

<sup>7</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 1274 (30, junio, 2006). Por la cual se acogen los términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental para la construcción y operación de rellenos sanitarios y se adoptan otras determinaciones. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2006. no. 46376. p. 1-26.

ambiental establecidos por la normatividad vigente, en este aspecto se consideran los indicadores que miden el desempeño ambiental del relleno sanitario, junto con la eficiencia y eficacia de las medidas de manejo ambiental tomadas en cuenta a partir de los resultados de la evaluación de parámetros de manejo ambiental, a partir de estos resultados, las autoridades de control ambiental podrán tomar medidas correctivas en caso de ser necesario.

Si bien las frecuencias de monitoreo establecidas permiten conocer y caracterizar los niveles de contaminación generados por la operación de los rellenos sanitarios, estas disposiciones no son suficientes para conocer el comportamiento de las variables relacionadas en la tabla 1, de forma continua y en tiempo real, por ende, no es posible ejecutar tareas de corrección o mitigación de impactos negativos en el ambiente de forma oportuna.

Dado que la quebrada “Las Cebollas” es uno de los afluentes que proporciona agua potable a la cabecera municipal de Oicatá, surge la necesidad de desarrollar sistemas de monitoreo que permiten estimar la calidad del agua proveniente de este caudal, considerando que a lo largo del cauce de la quebrada se encuentra la zona de influencia del relleno sanitario de Pirgua, de esta manera, se seleccionó el cauce de la quebrada “Las Cebollas” como un estudio de caso para el desarrollo del trabajo investigativo.

## 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

A partir del planteamiento del problema, y tomando en consideración las líneas de investigación del programa de Maestría en Tecnología Informática, se planteó la siguiente pregunta de investigación:

¿De qué manera una solución tecnológica basada en el paradigma de Internet de las Cosas puede contribuir a la inspección de la calidad de agua de fuentes hídricas superficiales?

## 1.3. JUSTIFICACIÓN

La disposición final de los residuos sólidos en rellenos sanitarios genera impactos en el ambiente en el cual se encuentran ubicados, esto a su vez puede afectar de manera significativa a la población circundante a la zona geográfica, para evitar este tipo de situaciones se deben tomar en cuenta los lineamientos legales que garanticen las condiciones mínimas establecidas por la normatividad vigente para la construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios.

El decreto 838 de 23 de marzo de 2005, la resolución 1274 de 2006 y los títulos E y F del reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS

2000)<sup>8</sup>, determinan los parámetros para la evaluación de los estándares de calidad ambiental correspondientes a la protección de aguas subterráneas y superficiales, como parte de los planes de manejo ambiental y los estudios de impacto ambiental que deben ser desarrollados por los operadores de los rellenos sanitarios.

Dentro de los parámetros de protección y evaluación de la calidad de las aguas subterráneas y superficiales, el marco legal determina las variables que deben ser monitoreadas y la frecuencia con la cual se deben desarrollar dichos procesos. Las variables involucradas para tales procesos de evaluación de la calidad de los recursos hídricos son: pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, metales pesados, DQO, y concentraciones de: amoníaco, nitritos y nitratos. Las frecuencias mínimas para el monitoreo de las variables mencionadas se especifican en periodos de tiempo: semestral, anual y bianual, esto supone una limitación al momento de programar tareas de control, tomando en cuenta que se trabaja con análisis de datos adquiridos en momentos específicos y no a partir de un seguimiento continuo de las variables involucradas.

El desarrollo del trabajo de investigación, se justificó en la necesidad de contar con un sistema para el monitoreo de las variables requeridas para la evaluación de los estándares de calidad ambiental sobre el caudal de la quebrada las Cebollas, el cual circunda la zona de del Relleno Sanitario de Pírgua; desde la perspectiva de la gestión ambiental, se requirió de forma prioritaria, contar con una solución tecnológica ubicada en la quebrada del estudio de caso, con la cual se establecieran puntos de control respecto a las coordenadas geográficas donde se encuentra ubicado el relleno sanitario de Pírgua.

La situación mencionada, ofreció una oportunidad investigativa orientada a encontrar una solución que permita realizar un monitoreo constante del citado caudal, esto supone la necesidad de contar con un sistema de sensores interconectados a través de una red que no requiera de infraestructuras robustas y cuya demanda energética sea mínima. Bajo estas condiciones, el trabajo se puede enmarcar dentro de las redes de área amplia de baja potencia (LPWAN) y la tecnología IoT, que en conjunto proveen la posibilidad de enviar en tiempo real la información mediante plataformas Web Service para la generación de reportes y posterior planeación de actividades de control orientadas a mitigar posibles impactos negativos en el ambiente a causa de la disposición final de los residuos sólidos dentro del relleno sanitario y su impacto negativo sobre el caudal de la quebrada “Las Cebollas”.

---

<sup>8</sup> MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. REPÚBLICA DE COLOMBIA. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. RAS. Bogotá, D.C.: El Ministerio, 2017. 182 p.

El desarrollo del trabajo de investigación requirió considerar los siguientes aspectos:

Tabla 2. Aspectos considerados para el desarrollo de la solución tecnológica

ASPECTOS CONSIDERADOS PARA EL DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN TECNOLÓGICA	
1	Identificación y selección de sensores para el monitoreo de las variables en el caudal del estudio de caso.
2	Selección de plataforma IoT y protocolos para la construcción de una red inalámbrica que permita la orquestación de los servicios requeridos para la transmisión de datos entre dispositivos de bajo consumo.
3	Implementación de servicios web para atender la transaccionalidad de los sensores y el despliegue de la lógica operacional para el sistema.
4	Reporte en tiempo real del estado de las variables en la citada fuente hídrica, para la generación de alertas tempranas e incidencias.
5	Ejecución de tareas de control, por medio del despliegue de los diferentes protocolos que a nivel normativo o técnico se encuentren definidos, para aportar a la mitigación de los posibles impactos negativos sobre el ambiente y la población.

Fuente: Autor e investigadores.

En el trabajo se identificaron los parámetros y requerimientos necesarios para el monitoreo de variables ambientales, soportando el desarrollo de la solución tecnológica bajo el concepto de IoT, y la correspondiente selección de plataformas y dispositivos para dicho fin. Lo anterior permite identificar y monitorear el estado de las variables en el afluente de la quebrada del estudio de caso seleccionado, de forma que la autoridad ambiental cuente con herramientas que le ayuden a la toma de decisiones de manera oportuna.

El prototipo desarrollado permite el monitoreo constante de los parámetros ambientales, y de esta manera permite la identificación temprana de factores de riesgo, de acuerdo con los parámetros establecidos en la normatividad vigente para cada variable específica. La implantación de la solución tecnológica brinda la posibilidad de un monitoreo permanente y permite la planificación de tareas de control para mitigar los posibles impactos negativos en el ambiente que podrían llegar a afectar la población vecina a la fuente hídrica en cuestión, y que a su vez podría verse afectada a partir de la operación del relleno sanitario.

Para el caso específico de la quebrada “Las Cebollas” no se identificaron desarrollos tecnológicos guiados hacia la búsqueda e identificación de posibles impactos negativos originados por la su cercanía al Relleno Sanitario de Pírgua, lo anterior permitió inferir la necesidad, pertinencia y oportunidad para el desarrollo de la investigación, la cual se desarrolló como trabajo interdisciplinar, entre los grupos de investigación TelemaTICs y GISABA la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, junto con el acompañamiento de personal administrativo de Corpoboyacá, como autoridad ambiental.



## 1.4. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

En este numeral se presentan la hipótesis y, los objetivos general y específicos de la presente investigación, la cual se enmarca dentro de la línea de investigación de Internet de las Cosas, a partir del estudio de caso seleccionado correspondiente a la quebrada “Las Cebollas” en la zona circundante al relleno sanitario de Pirgua.

### 1.4.1 Hipótesis

Un sistema tecnológico basado en el paradigma IoT contribuirá a incrementar los niveles de eficiencia en cuanto al monitoreo, control y reporte de las variables de inspección sobre el caudal de la quebrada “Las Cebollas”, en virtud de la normatividad vigente.

### 1.4.2 Objetivo General

Desarrollar un sistema de supervisión de la calidad de caudales superficiales, basado en el paradigma de Internet de las Cosas, a partir de la normatividad ambiental vigente.

### 1.4.3 Objetivos Específicos

- Identificar las variables susceptibles de monitoreo de la calidad del agua en la fuente hídrica seleccionada como estudio de caso, desde la perspectiva de los instrumentos de medición por medio de sensores IoT, en virtud de los parámetros normativos.
- Diseñar un sistema de supervisión de las variables identificadas, generando alertas y estadísticas, en correspondencia con los márgenes técnicos y normativos.
- Implementar una solución tecnológica como prototipo, en correspondencia con el paradigma de Internet de las Cosas para el sistema diseñado.
- Desarrollar pruebas de desempeño de la solución tecnológica.

## 1.5. METODOLOGÍA

La investigación es de tipo aplicada, la cual se desarrolló a partir del estudio de caso seleccionado del afluente de la quebrada “Las Cebollas” en la zona geográfica que circunda el relleno sanitario de Pirgua, se tuvo en cuenta un método de muestreo basado en la calibración y puesta en operación de sensores en puntos de control en el caudal del afluente de la quebrada, la investigación se orientó al desarrollo de una solución tecnológica basada en el Internet de las Cosas, para construir un

prototipo de herramienta para el monitoreo, reporte y programación de labores de control de los parámetros de calidad del recurso hídrico en el afluente “Las Cebollas”, este prototipo funcional puede ser tomado como herramienta de apoyo para el desarrollo de las labores de supervisión y programación de actividades por parte de la autoridad ambiental y el operador del relleno sanitario de Pírgua.

Se evidenció la necesidad para el desarrollo de la investigación desde las siguientes perspectivas:

**-Tecnológica:**

El desarrollo de Internet de las Cosas (IoT), enmarca un amplio espectro de posibilidades para la integración de dispositivos distantes, desde instrumentos a pequeña escala o no digitales, hasta las redes de intercambio de información, el objetivo de constituir sistemas e instrumentos inteligentes (gestionables que aporten y demanden información para suplir funciones dentro de un sistema); bajo esta perspectiva, la investigación explorará diferentes sensores, medios de transferencia de datos, protocolos, aplicaciones, entre otros, con el objetivo de orquestar la mejor configuración que aporte a la solución requerida por el estudio de caso de caso.

**-Trabajo interdisciplinar:**

El desarrollo de la investigación necesitó de la asesoría de profesionales expertos en las áreas de gestión ambiental y del manejo de las tecnologías IoT.

**-Integración de agentes externos:**

Para el desarrollo de la investigación y el prototipo de solución tecnológica, se evidenció la necesidad de contar con el apoyo de la autoridad ambiental y el operador del relleno sanitario de Pírgua, considerando que estas entidades serán las beneficiadas de forma directa al momento de incorporar la solución tecnológica propuesta dentro del desarrollo de sus actividades sustantivas.

**-Impacto académico en la región:**

La investigación propuesta cubre la necesidad de contar con herramientas y sistemas tecnológicas para el monitoreo de parámetros de calidad del recurso hídrico que abastece al municipio de Oicatá en el departamento de Boyacá, al ser una herramienta de apoyo a la toma de decisiones por parte del operador del relleno sanitario de Pírgua y la autoridad ambiental de la región, la solución propuesta ayudará a promover colateralmente el beneficio para los pobladores y consumidores de recurso hídrico de la quebrada “Las Cebollas”.

La evaluación del cumplimiento de los objetivos planteados en la investigación, se realiza a partir de la evidencia incluida respecto a las variables del caso y sus

correspondientes indicadores de cumplimiento; la tabla 3, muestra tal relación, que es requerida para la evaluación de la solución tecnológica propuesta.

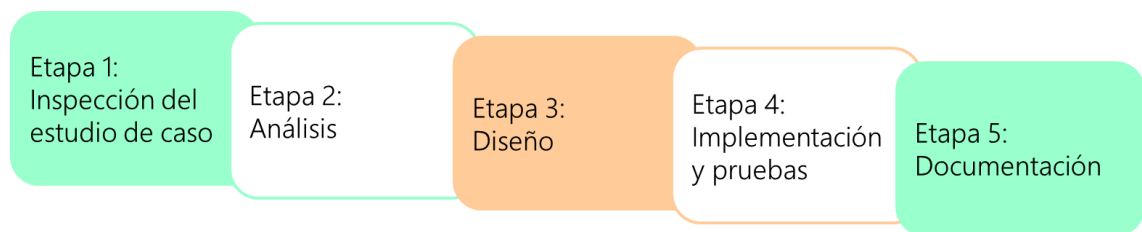
Tabla 3. Variables e indicadores para la evaluación de la investigación

VARIABLES		INDICADORES
1	Elementos del sistema IoT: sensores, medios de transferencia de datos, protocolos, aplicaciones, baterías y placas para desarrollo.	Caracterización y selección de elementos IoT para la implementación tecnológica en el estudio de caso.
2	Monitoreo del caudal	Identificación, selección e implementación de solución para las variables tratables en el caudal del estudio de caso.
3	Control del caudal	Identificación de los parámetros de tolerancia sobre el caudal e implementación de un sistema para su análisis y operación.
4	Reporte del caudal	Identificación de los agentes y medios por los que es necesario emitir informes sobre la dinámica del caudal.
5	Normatividad	Identificación de las normas vigentes para el tratamiento del estudio de caso.
6	Eficiencia de la solución	Estudio comparado de las implicaciones de la solución alcanzada con respecto a información previa de los agentes externos (operador y autoridad ambiental).

Fuente: Autor e investigadores.

La investigación se realizó siguiendo las etapas que se presentan en la Figura 1, las cuales son requeridas para dar cumplimiento a los objetivos propuestos para el diseño y construcción del prototipo del sistema IoT para la supervisión de los parámetros de calidad del agua en el afluente de la quebrada “Las Cebollas”, partiendo de la necesidad de dar cumplimiento según los parámetros establecidos en normatividad ambiental colombiana.

Figura 1. Etapas de desarrollo del proyecto



Fuente: Autor e investigadores.

Las tablas 4, 5, 6, 7 y 8, presentan el listado de las actividades requeridas para el desarrollo de cada una de las etapas del proyecto, junto con su correspondiente descripción.

Tabla 4. Desarrollo metodológico para la etapa 1

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
1	Revisión de normatividad para monitoreo y control de parámetros de calidad de recursos hídricos por afectación de la operación de rellenos sanitarios.
2	Documentación y revisión del estado del arte sobre medición de variables en afluentes hídricos, mediante: instrumentación electrónica, sensores, adquisición de datos, dispositivos Hardware, Software, redes inalámbricas y sistemas con tecnologías del Internet de las Cosas.

Fuente: Autor e investigadores.

Tabla 5. Desarrollo metodológico para la etapa 2

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
3	Caracterización del afluente de la quebrada "Las Cebollas", en lo relacionado con la identificación de los puntos críticos donde se debería realizar la medición y adquisición de datos de los parámetros de calidad, respecto a la ubicación de la quebrada en relación con el relleno sanitario de Pírgua.
4	Revisión de instrumentos sensores para identificación y selección de dispositivos para la medición de parámetros de calidad en el caudal de la quebrada "Las Cebollas".
5	Identificación de medios y plataformas para el despliegue de alertas tempranas e incidencias a partir del monitoreo de los parámetros de calidad del recurso hídrico en el caudal de la quebrada "Las Cebollas".

Fuente: Autor e investigadores.

Tabla 6. Desarrollo metodológico para la etapa 3

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
6	Selección de plataformas y protocolos para diseño e implementación de la red inalámbrica mediante la tecnología IoT para la transmisión de datos y la comunicación entre los dispositivos del sistema.
7	Diseño del sistema de información para el tratamiento de los datos captados.

Fuente: Autor e investigadores.

Tabla 7. Desarrollo metodológico para la etapa 4

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
8	Integración y prueba de funcionamiento de la red de sensores en red inalámbrica a partir de dispositivos de bajo consumo.
9	Determinación de tipos de reporte para despliegue de protocolos de acción y operación por parte de la autoridad ambiental y el operador del relleno sanitario de Pírgua.
10	Implementación del sistema de información
11	Integración y prueba de funcionamiento de red inalámbrica con plataformas y utilidades IoT.
12	Validación del funcionamiento y pruebas piloto del prototipo para el monitoreo, control y reporte de los parámetros de calidad en el caudal de la quebrada "Las Cebollas".

Fuente: Autor e investigadores.

Tabla 8. Desarrollo metodológico para la etapa 5

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
13	Generación de documentos de soporte al sistema y reportes necesarios
14	Elaboración del libro, artículo y ponencia sobre resultados parciales o finales de la investigación, esta etapa se realizará de forma paralela con el desarrollo de las etapas anteriores.
15	Conformación de banco de trabajos de investigación futuros relacionados con la investigación desarrollada.

Fuente: Autor e investigadores.

## 2. MARCO REFERENCIAL

En este capítulo se presenta el marco referencial para la investigación; se compone de un marco conceptual donde se incluyen los conceptos de la calidad del agua y la certificación RoHS, el marco teórico donde se toma en consideración aspectos relacionados con el recurso hídrico, el manejo y operación de los rellenos sanitarios y el Internet de las Cosas, el marco legal que incluye las diferentes directrices normativas vigentes relacionadas con el monitoreo y control del recurso hídrico y finalmente el estado de arte; a continuación se relacionan dichos aspectos.

### 2.1. MARCO CONCEPTUAL

#### - Certificación RoHS:

La sigla RoHS, en inglés hace referencia a: Restriction of Hazardous Substances, en español se refiere a la restricción de sustancias peligrosas. La certificación RoHS, surge con el objeto de establecer restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos, la certificación fue adoptada por la directiva 2011/65/UE<sup>9</sup> promulgada por el Parlamento Europeo y del Consejo el 8 de junio de 2011, esta disposición legal también es conocida como la Directiva RoHS; la directiva restringe el uso de sustancias como: plomo, mercurio, cadmio, cromo hexavalente, bifenilos polibromados y éteres difenil polibromados.

#### - Calidad de agua:

Existen diferentes estándares para la medición de parámetros de calidad del agua, los cuales tienen el propósito especificar los requisitos sobre la idoneidad para el uso del agua para usos industriales, consumo humano, calderas, entre otros; como aspecto común, todos los estándares buscan garantizar un tratamiento adecuado antes de disponer del agua para su uso o consumo final, bien sea para consumo humano, animal, uso en agricultura o en la industria, pero en común, todos los estándares buscan la protección de la salud pública, del recurso hídrico y ambiente acuático<sup>10</sup>.

La comunidad europea, ha establecido directivas y reglamentos para la disposición y estandarización de parámetros relacionados con el recurso hídrico según su uso final, dentro de estas se destacan:

- Directiva sobre aguas superficiales: 75/440 CEE
- Directiva sobre aguas de baño: 76/160/ CEE

---

<sup>9</sup> UNIÓN EUROPEA. PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO. Directiva 2011/65/UE (8, junio, 2011). Sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos. Diario Oficial de la Unión Europea. Estrasburgo, 2011. no. L 174. p. 1-116.

<sup>10</sup> ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Parameters of water quality. Interpretations and Standards. Wexford.: Environmental Protection Agency, 2001. ISBN 1-84096-015-3.

- Directiva sobre sustancias peligrosas: 76/464/ CEE
- Directiva sobre peces de agua dulce: 78/659/ CEE
- Directiva de aguas subterráneas: 80/68/ EEC
- Directivas sobre agua potable: 80/778/ CEE y 98/83/ CE

El aspecto sobre el cual convergen las directivas promulgadas por la Comunidad Europea, son los objetivos de calidad orientados hacia el mantenimiento de un adecuado estado ecológico<sup>11</sup>.

La calidad del agua puede verse afectada por diferentes parámetros, los cuales se pueden clasificar como: influencia por causas naturales y afectación por actividades humanas. La tabla 9, muestra la clasificación de los factores que afectan la calidad del recurso hídrico.

Tabla 9. Factores que afectan la calidad del agua

CONDICIONES NATURALES	IMPACTO POR FACTOR HUMANO SOBRE FUENTES HÍDRICAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geología</li> <li>- Clima</li> <li>- Vegetación</li> <li>- Morfología</li> <li>- Locación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ríos y arroyos</li> <li>- Lagos y estanques</li> <li>- Humedales</li> <li>- Bahías y estuarios</li> <li>- Océanos y mares</li> <li>- Aguas subterráneas</li> <li>- Agua atmosférica</li> </ul>

Fuente: KENNETH M. Vigil<sup>12</sup>.

La clasificación sobre las condiciones naturales hace referencia a las diferentes formas que adopta el agua en el ambiente natural: ríos, arroyos, lagos, estanques, humedales, bahías, estuarios, océanos y mares, y las aguas subterráneas; para cada caso específico se han determinado características específicas de calidad del agua, la calidad del agua es afectada tanto, por la actividad humana como por las condiciones naturales en el medio ambiente. Las principales condiciones naturales que afectan la calidad de agua son: la geología, el clima, la cantidad y tipo de vegetación presente, las características morfológicas de la fuente hídrica (tamaño, forma, profundidad y la ubicación del agua en el entorno)<sup>13</sup>.

La calidad del agua superficial se relaciona de forma directa con el entorno y el uso de la tierra, el agua nunca es pura debido a que su calidad se ve afectada por los usos agrícolas, urbanos, industriales y recreativos, de igual forma, la modificación de los caudales naturales y el clima también afectan la calidad del agua; el agua subterránea también es vulnerable a la contaminación cuando está cerca de zonas urbanas o industriales. En las cabeceras o nacimientos de los ríos la calidad del agua en comparación al resto del recorrido del afluente, en la altura la lluvia es a menudo abundante, y disminuyen las precipitaciones en la medida que los caudales

<sup>11</sup> Ibid., p. 11.

<sup>12</sup> KENNETH M. Vigil. The water environment. En: Clean water: an introduction to water quality and water pollution control. 2 ed. Corvallis.: Oregon State University Press, 2003. p. 7-22.

<sup>13</sup> Ibid., p. 10.

se dirigen hacia las donde se presenta un mayor uso del suelo y el agua, aumenta así los porcentajes de contaminación<sup>14</sup>.

Toda actividad humana o generada de forma colateral, impacta de manera directa los parámetros de calidad del agua, los ríos de forma frecuente son utilizados para la disposición final de residuos, de esta forma todo vertimiento sobre los afluentes hídricos afectara a los usuarios y consumidores del recurso hídrico del afluente, los ríos se constituyen en una de las principales fuentes de abastecimiento de agua para el consumo humano, sin embargo, los afluentes hídricos se encuentran expuestos a la contaminación a través de agentes fertilizantes, pesticidas y herbicidas<sup>15</sup>.

Existen mecanismos directos e indirectos que afectan a los afluentes hídricos. Dentro de los mecanismos directos están las descargas por escorrentía de aguas pluviales debido a que el agua lluvia recoge los agentes contaminantes presentes en el aire, dentro de las descargas directas se incluyen los materiales y sustancias vertidas en los afluentes, como lo es el caso de los aceites, anticongelantes, jabones y pinturas, las cuales generan mayores impactos negativos disminuyendo así la calidad del agua<sup>16</sup>, la presencia de contaminantes en el agua se utilizan para evaluar la calidad del agua<sup>17</sup>.

La normatividad colombiana, a través del decreto 1575 del 09 de mayo de 2017<sup>18</sup>, establece las disposiciones para la protección y control de la calidad del agua, considerando aspectos como el monitoreo, la prevención y el control de los riesgos para la salud humana a partir del consumo del agua<sup>19</sup>. El decreto en cuestión también define la calidad del agua a partir de los resultados de los procedimientos de comparación de las características físicas, químicas y microbiológicas encontradas en el agua, con los parámetros y rangos establecidos en las normas que regulan estos aspectos.

El decreto 1575 del 09 de mayo de 2017, contempla la calidad del agua ya sea envasada o en estado crudo<sup>20</sup>, entendiendo esta última como el agua natural que no ha sido sometida a proceso de tratamiento para su potabilización, de igual manera el decreto define el agua potable o apta para el consumo humano, como aquella que cumple con los parámetros físicos, químicos y microbiológicos, acorde

---

<sup>14</sup> SAMBORSKA, Katarzyna; ULANCZYK, Rafal y KORSZUN, Katarzyna. Monitoring and modelling of water quality. En: VOUDOURIS, Kostas y VOUTSA, Dimitra. Water quality monitoring and assessment. Rijeka.: InTech. 2012. p. 189-226.

<sup>15</sup> MULEI KITHIHA, Shadrack. Water quality degradation trends in kenya over the last decade. En: VOUDOURIS, Kostas y VOUTSA, Dimitra. Water quality monitoring and assessment. Rijeka.: InTech. 2012. p. 509-526.

<sup>16</sup> POSTOLACHE, Octavian; SILVA GIRÃO, Pedro y DIAS PEREIRA, José Miguel. Water quality monitoring and associated distributed measurement systems: an overview. En: VOUDOURIS, Kostas y VOUTSA, Dimitra. Water quality monitoring and assessment. Rijeka.: InTech. 2012. p. 25-66.

<sup>17</sup> *Ibid.*, p. 26.

<sup>18</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. Decreto 1575 (09, mayo, 2007). Por el cual se establece el sistema para la protección y control de la calidad del agua para consumo humano. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2007. no. 46623. p. 1-13.

<sup>19</sup> *Ibid.*, p. 1.

<sup>20</sup> *Ibid.*, p. 1.

con las condiciones establecidas en este mismo decreto y en la resolución 2115 de 22 de junio de 2007<sup>21</sup>, demás normas mediante las cuales se definen las características del agua para consumo humano, como bebida directa, para la preparación de alimentos y en su uso para higiene personal.

Tanto resolución 2115 de 22 de junio de 2007<sup>22</sup>, como el decreto 1575 del 09 de mayo de 2017<sup>23</sup>, determinan los parámetros para monitoreo y control de los factores de la calidad del agua en las fuentes de abastecimiento ya sea de aguas superficiales o subterráneas, a partir de las cuales se suministra el recurso hídrico a la población.

El desarrollo de la presente investigación surgió ante la necesidad de contar con una herramienta de utilidad y apoyo a la implantación de los planes operacionales de emergencia que exige la legislación a los operadores de acueductos y rellenos sanitarios y que buscan la ejecución de tareas de control en las cuales participan las autoridades ambientales territoriales y los operadores de rellenos sanitarios y acueductos; con el fin de disminuir los factores de riesgo, entendidos como toda aquella sustancia o agente que genere o produzca alteraciones a la salud a partir del su consumo o exposición directa<sup>24</sup>, en este aspecto, la investigación y el prototipo de solución desarrollada se constituye como una herramienta de apoyo a los sistemas de vigilancia, protección y control de la calidad del agua para consumo humano.

La tabla 1 presentó los parámetros que deben ser monitoreados en los acuíferos cercanos a los rellenos sanitarios y sus frecuencias mínimas de monitoreo, de igual manera determina las frecuencias de monitoreo para el control de lixiviados y calidad de los vertimientos a fuentes superficiales de los parámetros: pH, oxígeno disuelto, metales pesados, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno 5 días y sólidos suspendidos totales, la tabla 10, relaciona estos aspectos.

Tabla 10. Frecuencia de monitoreo en afluentes superficiales

Variable	Frecuencia de Monitoreo	
	Menor o igual a 15 TM/día	Mayor a 15 TM/día
pH	Semestral	Anual
Oxígeno disuelto	Semestral	Anual
Metales pesados	Semestral	Anual
Demanda química de oxígeno	Semestral	Anual
Demanda bioquímica de oxígeno 5 días	Semestral	Anual
Sólidos suspendidos totales	Semestral	Anual

<sup>21</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL Y MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. Resolución 2115 (22, junio, 2007). Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2007. no. 46679. p. 1-26.

<sup>22</sup> Ibid., p. 4.

<sup>23</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. Decreto 1575 (09, mayo, 2007). Por el cual se establece el sistema para la protección y control de la calidad del agua para consumo humano. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2007. no. 46623. p. 1-13.

<sup>24</sup> Ibid., p. 3.



Fuente: Decreto 838 de 23 de marzo de 2005<sup>25</sup>.

- Parámetros para la medición de factores de calidad del agua:

La legislación colombiana para la medición de parámetros de calidad del agua, está conforme con las reglamentaciones internacionales, el decreto 838 de 23 de marzo de 2005<sup>26</sup>, incluye el listado de variables sujetas a monitoreo, estas son: pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, metales pesados, DQO (Demanda Química de Oxígeno), y las concentraciones de: amoníaco, nitritos y nitratos, para el estudio de caso de la presente investigación, se realiza el monitoreo de las variables de pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto.

En la actualidad el campo para el diseño de sistemas de monitoreo de la calidad del agua ha sido objeto de estudio, sin embargo, es un campo complejo considerando que existe una gran cantidad de indicadores y factores que afectan la calidad del recurso hídrico dependiendo de los usos específicos del agua, tal como se expone en el compendio de trabajos de investigación, presentados por VOUDOURIS, Kostas y VOUTSA, Dimitra en el año 2012<sup>27</sup>.

- Potencial de hidrógeno:

La variable pH, es la medición del potencial de hidrógeno que indica la actividad de iones de hidrogeno (H<sup>+</sup>) en una solución, este parámetro permite cuantificar el grado de acidez o alcalinidad en una solución química y para el caso particular, el nivel de acidez en el agua, el nivel de pH mide la concentración de átomos de hidrógeno en términos de gramos/litro:

Ecuación 1. Potencial de hidrógeno en una solución

$$\text{pH} = \log_{10}[1/\text{H}^+]$$

Para la ecuación 1, H<sup>+</sup>, es la concentración de iones de hidrógeno en la solución, los valores para la magnitud de pH varían desde un valor de 0 hasta 14, el valor de 0 representa un nivel extremo de acidez, el valor máximo de pH 14 indica el nivel extremo de alcalinidad, hay que considerar que el nivel de pH en una muestra de agua pura tiene un valor de 7<sup>28</sup>.

Uno de los métodos más utilizados para la medición de pH es el papel tornasol, el cual es utilizado como indicador químico, este varia el color según el nivel del pH, sin embargo, este método es una aproximación al valor real que se adquiere a partir de condiciones de laboratorio. Uno de los campos de investigación durante los

---

<sup>25</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 838 (23, marzo, 2005). Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2005. no. 45862. p. 1-15.

<sup>26</sup> Ibid., p. 12.

<sup>27</sup> VOUDOURIS, Kostas y VOUTSA, Dimitra. Water quality monitoring and assessment. Rijeka.: InTech. 2012.

<sup>28</sup> MORRIS. Alan S. Summary of other measurements. En: Measurement and instrumentation principles. 3 ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2001. p. 437-439.

últimos años es el de la construcción de sensores de pH en línea, sin embargo, el tipo de instrumento más asequible corresponde a la sonda de electrodo de vidrio<sup>29</sup>.

Idealmente, sería mejor obtener valores de pH neutros, sin embargo, en la industria se han determinado rangos de tolerancia para los valores de pH según los usos previsto del agua, la siguiente tabla muestra algunos rangos óptimos para el valor de pH.

Tabla 11. Rangos óptimos para pH en el agua según su uso final

USO FINAL DEL AGUA	RANGOS ÓPTIMOS PARA EL VALOR DE pH
Agricultura	6,0 – 8,5
Irrigación	4,5 – 9,0
Consumo humano	5,0 – 9,0

Fuente: POSTOLACHE, Octavian; SILVA GIRÃO, Pedro y DIAS PEREIRA, José Miguel<sup>30</sup>.

#### - Conductividad eléctrica:

La conductividad eléctrica, es el parámetro inverso a la resistencia eléctrica, la unidad de medición para esta variable es el Siemens (S), para entender la importancia de este parámetro como factor determinante de la calidad del agua, hay que partir del concepto de la resistividad eléctrica de un material, lo cual indica la propiedad del mismo para impedir el flujo de electricidad. Si la electricidad tiene la capacidad de fluir fácilmente a través de un material, significa que dicho material tiene un bajo valor de resistividad<sup>31</sup>.

En los líquidos, y en particular en el agua, la conductividad eléctrica, es un factor que indica el nivel de sales disueltas en el líquido, por lo tanto, se obtiene una relación proporcional en la capacidad del líquido para permitir la conducción de corriente eléctrica, esto se puede relacionar con la cantidad de sólidos disueltos en el agua, lo cual para el estudio de caso puede indicar el nivel de contaminación del agua.

#### - Oxígeno disuelto:

La medición de oxígeno disuelto corresponde al tercer parámetro elegido para determinar la calidad del agua del afluente de la quebrada “Las Cebollas”, esta variable mide el volumen de oxígeno contenido en el agua. La cantidad de oxígeno que puede contener el agua depende de la temperatura del agua, la salinidad y la presión; la solubilidad del oxígeno en el agua aumenta con la disminución

<sup>29</sup> Ibid., p. 438.

<sup>30</sup> POSTOLACHE, Octavian; SILVA GIRÃO, Pedro y DIAS PEREIRA, José Miguel. Water quality monitoring and associated distributed measurement systems: an overview. En: VOUDOURIS, Kostas y VOUTSA, Dimitra. Water quality monitoring and assessment. Rijeka.: InTech. 2012. p. 37-38.

<sup>31</sup> WEBSTER, John G. Electromagnetic variables measurement. En: The measurement, instrumentation and sensors Handbook. Boca Raton: CRC Press LLC and IEEE Press. 1999. p. 1332-1335.

temperatura, es decir, a una menor temperatura del agua, se espera una mayor cantidad de oxígeno, por otro lado, la solubilidad del oxígeno en el agua aumenta a medida que disminuye la salinidad del agua, debido a esto, existe una mayor concentración de oxígeno en el agua dulce, en comparación con la cantidad de oxígeno disuelto en el agua salada.

Debido a factores como la altitud y la presión, la cantidad de oxígeno disuelto también se ve afectada, a mayor altitud la cantidad de oxígeno disminuye, entre menor sea la presión disminuye la cantidad de oxígeno en el agua<sup>32</sup>, debido a lo anterior, el oxígeno en el agua disminuye en la medida en que la fuente hídrica se encuentre a mayor altitud ya que disminuye la presión atmosférica<sup>33</sup>.

- Acidez:

Un ácido es un compuesto químico ácido que contiene hidrógeno que se disuelve en agua y da lugar a iones de hidrógeno, o reacciona con un álcali para formar una sal y agua, mediante pruebas en laboratorio se puede identificar si una sustancia es ácida, para esto se puede utilizar el papel tornasol, y de tratarse de un compuesto ácido, el papel tornasol, obtiene una coloración roja.

- Alcalinidad:

El término alcalino hace referencia a una mayor concentración de álcali o hidróxido metálico soluble en el agua; respecto a la concentración de ácido, el nivel de alcalinidad se puede medir en el agua a partir de la medición del potencial de hidrógeno, este tendrá un valor mayor a 7, un mayor nivel de pH en el agua hace que la misma no sea adecuada para el consumo humano, de igual manera en terreno, un mayor nivel de alcalinidad no permite que sea empleado para el desarrollo de cultivos.

El álcali o hidróxido metálico soluble en el agua, es una sustancia que reacciona con un ácido para formar una sal y agua, puede ser ya sea una base soluble o una solución de una base que tiene un valor de pH de mayor a 7.

## 2.2. MARCO TEÓRICO

Para el desarrollo del trabajo se consideraron tres aspectos: caudales y tipos de afluentes hídricos, operación de rellenos sanitarios e Internet de las Cosas; a partir de estos tres conceptos se formuló la problemática que originó el desarrollo del presente trabajo, en este apartado se incluye la definición de estos conceptos, para dar la introducción a la solución implementada

---

<sup>32</sup> POSTOLACHE, Octavian; SILVA GIRÃO, Pedro y DIAS PEREIRA, José Miguel. Water quality monitoring and associated distributed measurement systems: an overview. En: VOUDOURIS, Kostas y VOUTSA, Dimitra. Water quality monitoring and assessment. Rijeka.: InTech. 2012. p. 40-42.

<sup>33</sup> ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. The principal parameters of water quality. En: Parameters of water quality. Interpretations and Standards. Wexford.: Environmental Protection Agency, 2001. P. 79-81.

### 2.2.1 Consideraciones generales sobre el recurso hídrico.

Como se mencionó en capítulos anteriores, el afluente de la quebrada “Las Cebollas”, coincide geográficamente con la zona de influencia del relleno sanitario de Pírgua, y es importante tener en cuenta los siguientes aspectos:

1. El agua del afluente de la quebrada es una de las fuentes de abastecimiento del sistema de acueducto del municipio de Oicatá (Boyacá).
2. En la zona se ubican pobladores rurales que pueden hacer uso del recurso hídrico de la quebrada ya sea para consumo humano o para abastecimiento de agua para animales de granja.

Estos dos aspectos, podrían llegar a ser agentes que afecten la calidad del agua de la quebrada “Las Cebollas”, por lo tanto, es necesario considerar términos específicos del cuerpo de conocimientos propios del estudio de la calidad del agua y los protocolos de monitoreo, para caracterizar el afluente de la quebrada en la zona de influencia del relleno sanitario, caracterización que se incluye en el capítulo 7, del presente trabajo.

Para la caracterización de afluentes hídricos se requiere considerar los siguientes parámetros:

---

#### Parámetro 1: El agua de la quebrada “Las Cebollas es un recurso”

---

Considerando este parámetro, se adopta la siguiente definición de recurso, según la normatividad colombiana vigente.

- Recurso: se entiende como recurso todas las aguas superficiales, subterráneas, marinas y estuarinas<sup>34</sup>.

---

#### Parámetro 2: El agua de la quebrada “Las Cebollas” es una fuente abastecimiento de agua cruda.

---

A partir de este segundo postulado, se deben adoptar las definiciones según la normatividad vigente para fuente de abastecimiento y agua cruda.

- Fuente de abastecimiento: depósito o curso de agua superficial o subterránea, utilizada en un sistema de suministro a la población, bien sea de aguas atmosféricas, superficiales, subterráneas o marinas<sup>35</sup>.

---

<sup>34</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 3100 (30, octubre, 2003). Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2003. no. 45357. p. 1-13.

<sup>35</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. Decreto 1575 (09, mayo, 2007). Por el cual se establece el sistema para la protección y control de la calidad del agua para consumo humano. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2007. no. 46623. p. 1-13.

- Agua cruda: es el agua natural que no ha sido sometida a proceso de tratamiento para su potabilización<sup>36</sup>.

---

Parámetro 3: El agua de la quebrada “Las Cebollas” es una fuente de agua para consumo humano.

---

Según lo establecido en el postulado 3, se requiere adoptar una definición adecuada para el término: agua para consumo humano, esta se toma de la normatividad colombiana vigente establecida mediante el decreto 1575 de 2007, para el agua potable, o también definida como agua para consumo humano.

- Agua potable o agua para consumo humano: es aquella que, por cumplir las características físicas, químicas y microbiológicas, en las condiciones señaladas en el presente decreto y demás normas que la reglamenten, es apta para consumo humano. Se utiliza en bebida directa, en la preparación de alimentos o en la higiene personal<sup>37</sup>.

---

Parámetro 4: Para caracterizar el recurso de la quebrada “Las Cebollas” es necesario identificar los tipos de vertimientos que la afectan.

---

Para realizar la caracterización de recurso de la quebrada, se deben identificar los tipos de vertimientos definidos según los entes gubernamentales y ambientales, que, para el caso de Colombia, son determinados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), que se encarga del administrar la información científica, hidrológica, meteorológica ambiental en Colombia, en el documento “Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas”, define vertimientos puntuales e industriales, en los siguientes en los siguientes términos:

- Vertimientos Puntuales: corresponde a los vertimientos de origen industrial, doméstico y/o de alcantarillado, realizados en un punto fijo, directamente o a través de un canal, al recurso<sup>38</sup>.

- Vertimientos Industriales: al igual que para los vertimientos puntuales a los cuerpos de agua, la ubicación del sitio o lugar de muestreo corresponde al punto de descarga, el cual podrá ser directamente a un cuerpo de agua o a un alcantarillado<sup>39</sup>.

---

<sup>36</sup> Ibid., p. 1.

<sup>37</sup> Ibid., p. 1.

<sup>38</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (Colombia). Selección del sitio de muestreo. En: Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. Bogotá. IDEAM. 2004. p. 9-10.

<sup>39</sup> Ibid., p. 9.

### 2.2.2 Rellenos sanitarios.

Otro de los aspectos a considerar, en lo correspondiente al monitoreo de los parámetros de calidad del agua del recurso hídrico de la quebrada “Las Cebollas”, es la ubicación del relleno sanitario de Pírgua (vereda de Tunja), en la zona circundante a la misma, por lo tanto, para el desarrollo del trabajo se consideró el siguiente parámetro:

---

Parámetro 5: la calidad del recurso hídrico de la quebrada “Las Cebollas”, podría llegar a verse afectada debido a ubicación y operación del relleno sanitario de Pírgua.

---

En concordancia con la normatividad vigente, se adoptan las definiciones para: relleno sanitario, receptor y residuo sólido (desecho).

- Residuo sólido o desecho: es cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales o de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final<sup>40</sup>.

- Relleno sanitario: es el lugar técnicamente seleccionado, diseñado y operado para la disposición final controlada de residuos sólidos, sin causar peligro, daño o riesgo a la salud pública, minimizando y controlando los impactos ambientales y utilizando principios de ingeniería, para la confinación y aislamiento de los residuos sólidos en un área mínima, con compactación de residuos, cobertura diaria de los mismos, control de gases y lixiviados, y cobertura final<sup>41</sup>.

- Receptor: persona prestadora del servicio público de aseo en la actividad complementaria de disposición final de residuos sólidos, quien los recibe para darles una disposición acorde con las normas técnicas-ambientales vigentes<sup>42</sup>.

El decreto 838 de 2005<sup>43</sup> determina de acuerdo con lo establecido en el numeral F.1.4.3 del Título F del RAS<sup>44</sup> o la norma que lo modifique, adicione o sustituya, que se debe: realizar una caracterización anual de los residuos sólidos y establecer tareas y protocolos de control y monitoreo de la calidad del recurso agua, como mínimo, según los parámetros y frecuencias señaladas en la Tabla 1 (Frecuencia para monitoreo de variables en acuíferos).

---

<sup>40</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 838 (23, marzo, 2005). Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2005. no. 45862. p. 1-15.

<sup>41</sup> Ibid., p. 3.

<sup>42</sup> Ibid., p. 3.

<sup>43</sup> Ibid., p. 14.

<sup>44</sup> MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. REPÚBLICA DE COLOMBIA. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. RAS. Bogotá, D.C.: El Ministerio, 2017. 182 p.

### 2.2.3 Internet de las Cosas (IoT).

Internet de las cosas (IoT), es la aplicación de las tecnologías que permiten la configuración de infraestructuras de red inteligentes que hacen posible la optimización y la automatización de una gran variedad de aplicaciones dentro de las cuales se encuentran: conexión inteligente de fábricas, máquinas, cadenas de suministro, monitoreo en redes inteligentes (Smart Grid), instalaciones de redes de suministro de gas y petróleo, soluciones de conectividad para medios de transporte masivo, marítimo, vías férreas, monitoreo y control de parámetros de calidad ambiental, entre otros campos de estudio<sup>45</sup>.

El concepto de Internet de las Cosas es asimilado como una red de redes, donde convergen redes individuales conectadas entre sí con niveles de seguridad, análisis y gestión de la información, siendo una tecnología que nació entre 2008 y 2009, el número de dispositivos conectados por persona ha incrementado en cantidad hasta el punto de superar en número respecto a la población mundial, en 2011 Cisco pronosticaba para 2015 la existencia de 25 billones de dispositivos conectados respecto a 7,2 billones de personas de la población mundial, con un promedio de 3,47 dispositivos conectados por persona, para el 2020 se prevé una población mundial de 7,6 billones de habitantes respecto a 50 billones de dispositivos conectados con un promedio de 6,58 dispositivos conectados por persona<sup>46</sup>.

El campo para el desarrollo de aplicaciones del Internet de las Cosas ha ampliado su rango de alcance, de tal manera que ha llegado a ser considerada como la nueva revolución industrial según Jeremy Rifkin<sup>47</sup>, lo cual supone la necesidad de lograr desde la ingeniería la generación de desarrollos innovadores que ofrezcan nuevas soluciones para las necesidades de la sociedad actual en los campos de análisis de consumo eléctrico, aplicaciones para la domótica y la inmótica, análisis de tráfico, monitoreo de redes de sensores, registro y análisis de variables climáticas, agricultura de precisión, alumbrado inteligente, control de sistemas de riego, medición de niveles de contaminación, entre muchos otros diversos campos para el desarrollo<sup>48</sup>.

## 2.3. MARCO LEGAL

El desarrollo de la investigación y la construcción del prototipo y el sistema propuesto, guardó relación con los requerimientos del marco legal colombiano,

---

<sup>45</sup> CISCO. Internet of Things (IoT). Cisco IoT accelerates digital transformation, delivering insight and action from your data [online]. [citado 2018 07 14]. Disponible desde Internet: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/internet-of-things/overview.html#~stickynav=6>>.

<sup>46</sup> IEEE. The Democratization of Innovation for the Internet of Things. IEEE Spectrum. [online]. [citado 2018 07 14]. Disponible desde Internet: <<https://spectrum.ieee.org/computing/networks/the-democratization-of-innovation-for-the-internet-of-things>>.

<sup>47</sup> IEEE. Jeremy Rifkin on the Internet of Things and the Next Industrial Revolution. IEEE Spectrum. [online]. [citado 2018 07 14]. Disponible desde Internet: <<https://spectrum.ieee.org/tech-talk/telecom/internet/jeremy-rifkin-on-the-internet-of-things-and-the-next-industrial-revolution>>.

<sup>48</sup> IEEE. The Democratization of Innovation for the Internet of Things. IEEE Spectrum. [online]. [citado 2018 07 14]. Disponible desde Internet: <<https://spectrum.ieee.org/computing/networks/the-democratization-of-innovation-for-the-internet-of-things>>.

sobre los procedimientos de vigilancia y control de los parámetros de calidad del recurso hídrico en fuentes de abastecimiento superficiales, la normatividad colombiana en lo referente a este tema está establecida mediante los siguientes documentos legales:

- Decreto 838 de 23 de marzo de 2005
- Resolución 1274 30 de junio de 2006
- Decreto 1575 del 09 de mayo de 2017
- Resolución 2115 de 22 de junio de 2007
- Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (títulos B, C y F)

### 2.3.1 Decreto 838 de 23 de marzo de 2005.

El objeto del decreto es promover y facilitar las tareas de: planificación, construcción y operación de los sistemas de disposición final de residuos sólidos, al ser esta una actividad complementaria del servicio público de aseo a través de los rellenos sanitarios. El decreto reglamenta a la vez todos aquellos procedimientos a seguir por parte de las entidades territoriales para la selección de áreas potenciales para la ubicación de rellenos sanitarios, estableciendo procedimiento, criterios, metodología, prohibiciones y restricciones para la localización de las áreas destinadas para la disposición final de residuos sólidos<sup>49</sup>.

En el capítulo II, el decreto establece los parámetros para el control y monitoreo en las áreas dispuestas para la disposición final de residuos sólidos, estas deben ser acatadas por todos los prestadores del servicio público, en lo referente al monitoreo de aguas subterráneas, las fuentes superficiales y los puntos para el control y monitoreo de la calidad del recurso agua, en este aspecto se determinan los parámetros que deben ser monitoreados y la frecuencia con la que se deben realizar estas actividades, la tabla 1, presenta los parámetros contemplados en la norma, los cuales son: pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, metales pesados, DQO (Demanda Química de Oxígeno), y las concentraciones de: amoníaco, nitritos y nitratos, y establece las frecuencias mínimas para el monitoreo de las mismas. El decreto también establece las frecuencias de monitoreo para lixiviados y calidad del vertimiento a fuentes superficiales<sup>50</sup>.

### 2.3.2 Resolución 1274 del 30 de junio de 2006.

Esta resolución determina todos aquellos aspectos relacionados con la localización, justificación, construcción y operación de los rellenos sanitarios, mediante la definición de mecanismos, procedimientos y métodos de recolección, procesamiento y análisis de la información.

---

<sup>49</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 838 (23, marzo, 2005). Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2005. no. 45862. p. 1-15.

<sup>50</sup> Ibid., p. 12.



La resolución define los objetivos generales y específicos de los estudios de impacto ambiental de los proyectos de diseño y construcción de rellenos sanitarios a partir de la descripción, caracterización y análisis del ambiente en el cual se planea construir el relleno sanitario, con el fin de identificar los posibles impactos como consecuencia de su ubicación, para así diseñar las medidas de seguimiento y monitoreo<sup>51</sup>.

La resolución 1274 del 30 de junio de 2006, también especifica los parámetros para la adopción de medidas de prevención, corrección, compensación y mitigación de los impactos ambientales del proyecto, así como los procesos de evaluación en lo referente al desempeño ambiental, a partir de los estándares de calidad, establecidos en las normas ambientales nacionales vigentes las cuales son compatibles con los tratados y convenios internacionales; sistemas de seguimiento y control ambiental, que permitan evaluar el comportamiento, eficiencia y eficacia del plan de manejo ambiental durante las etapas de construcción y operación de los rellenos sanitarios, así como los planes de contingencia, a partir de la identificación y evaluación de riesgos naturales, tecnológicos y sociales asociados a la construcción y operación del proyecto<sup>52</sup>.

### 2.3.3 Decreto 1575 del 09 de mayo de 2017.

Este decreto establece los parámetros legales sobre el control y protección de la calidad del agua, mediante factores de monitoreo, prevención y control de los factores que suponen riesgo para la salud humana, por causa de su consumo. Este decreto no abarca los factores derivados del consumo del agua envasada; para la investigación, se tomaron como referencias, las siguientes definiciones:

Agua cruda: es el agua natural que no ha sido sometida a proceso de tratamiento para su potabilización<sup>53</sup>.

Agua potable o agua para consumo humano: es aquella que, por cumplir las características físicas, químicas y microbiológicas, en las condiciones señaladas en el presente decreto y demás normas que la reglamenten, es apta para consumo humano. Se utiliza en bebida directa, en la preparación de alimentos o en la higiene personal<sup>54</sup>.

---

<sup>51</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 1274 (30, junio, 2006). Por la cual se acogen los términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental para la construcción y operación de rellenos sanitarios y se adoptan otras determinaciones. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2006. no. 46376. p. 1-26.

<sup>52</sup> Ibid., p. 2.

<sup>53</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. Decreto 1575 (09, mayo, 2007). Por el cual se establece el sistema para la protección y control de la calidad del agua para consumo humano. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2007. no. 46623. p. 1-13.

<sup>54</sup> Ibid., p. 1.

Análisis de vulnerabilidad: es el estudio que permite evaluar los riesgos a que están expuestos los distintos componentes de un sistema de suministro de agua<sup>55</sup>.

Buenas prácticas sanitarias: son los principios básicos y prácticas operativas generales de higiene para el suministro y distribución del agua para consumo humano, con el objeto de identificar los riesgos que pueda presentar la infraestructura<sup>56</sup>.

Calidad del agua: es el resultado de comparar las características físicas, químicas y microbiológicas encontradas en el agua, con el contenido de las normas que regulan la materia<sup>57</sup>.

Fuente de abastecimiento: depósito o curso de agua superficial o subterránea, utilizada en un sistema de suministro a la población, bien sea de aguas atmosféricas, superficiales, subterráneas o marinas<sup>58</sup>.

Riesgo: probabilidad de que un agente o sustancia produzca o genere una alteración a la salud como consecuencia de una exposición al mismo<sup>59</sup>.

Sustancias potencialmente tóxicas: son aquellas de origen natural o sintético que pueden ocasionar efectos nocivos a organismos con los cuales entran en contacto. Incluye sustancias utilizadas en actividades domésticas, producción de bienes o servicios y plaguicidas, que pueden estar presentes en el agua para consumo humano<sup>60</sup>.

Índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano (IRCA): es el grado de riesgo de ocurrencia de enfermedades relacionadas con el no cumplimiento de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua para consumo humano<sup>61</sup>.

#### 2.3.4 Resolución 2115 de 22 de junio de 2007.

En el capítulo II, esta resolución define las características químicas y físicas que debe tener el agua destinada al consumo humano<sup>62</sup>, determinando los siguientes rangos:

---

<sup>55</sup> Ibid., p. 1.

<sup>56</sup> Ibid., p. 2.

<sup>57</sup> Ibid., p. 2.

<sup>58</sup> Ibid., p. 2.

<sup>59</sup> Ibid., p. 3.

<sup>60</sup> Ibid., p. 3.

<sup>61</sup> Ibid., p. 8.

<sup>62</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL Y MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. Resolución 2115 (22, junio, 2007). Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2007. no. 46679. p. 1-26.

Tabla 12. Parámetros normativos para las características físicas del agua

PARÁMETRO	RANGOS PERMITIDOS PARA EL CONSUMO HUMANO
Conductividad	El valor máximo permitido es de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; el valor se puede ajustar según los promedios habituales de la zona y el mapa de riesgo; se considera que un incremento superior al 50% se debe a un incremento en la cantidad de sólidos disueltos en el agua y amerita un proceso de investigación inmediato por parte de las autoridades sanitarias y ambientales y la persona prestadora que suministra o distribuye agua para consumo humano.
Potencial de hidrógeno (pH)	Para el consumo humano el valor del pH del agua, debe estar comprendido en el rango entre 6.5 y 9.

Fuente: Resolución 2115 de 22 de junio de 2007<sup>63</sup>.

Los valores presentados en la Tabla 12, se tomaron en cuenta para el diseño lógico de la solución tecnológica propuesta en esta investigación.

### 2.3.5 Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico.

La resolución 0330 del 8 de junio 2017, del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, adopto el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS)<sup>64</sup>, es el documento que reglamenta los requisitos técnicos que implican las etapas de: diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de infraestructura, correspondientes a la prestación de servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo; esta resolución deroga las resoluciones: 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009<sup>65</sup>.

En el capítulo 4, la resolución de 0330 del 8 de junio 2017, define los parámetros de operación y mantenimiento de los sistemas de los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo, en el artículo 31, se determina que se deben implementar sistemas de instrumentación, monitoreo y control de los servicios de acueducto, alcantarillado y/o aseo. Para la presente investigación el artículo 31 de la resolución mencionada<sup>66</sup> es parte del referente que sustenta el desarrollo, en la medida que se requiere garantizar un nivel adecuado de la calidad del agua del afluente de la quebrada “Las Cebollas”, según la normatividad vigente, la cual es la fuente que abastece el sistema de acueducto que suministra el agua potable al municipio de Oicatá (Boyacá), tomando en cuenta su ubicación en el área circundante al relleno sanitario de Pírgua.

<sup>63</sup> Ibid., p. 3.

<sup>64</sup> MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. REPÚBLICA DE COLOMBIA. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. RAS. Bogotá, D.C.: El Ministerio, 2017. 182 p.

<sup>65</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Resolución 0330 (8, junio, 2017). Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2017. no. 50267. p. 1-182.

<sup>66</sup> Ibid., p. 24.

## 2.4. ESTADO DE ARTE

Se realizó una revisión del estado de arte sobre los sistemas de monitoreo a variables y parámetros de calidad ambiental, en lo pertinente a recursos hídricos, logrando identificar que la mayoría de los sistemas de monitoreo de variables en fuentes hídricas tiene un elevado costo de implementación con escasas posibilidades de escalabilidad en mayor proporción. Se tomaron en cuenta trabajos que buscan el desarrollo de sistemas y herramientas de baja inversión económica y diseñados a partir de tecnologías de monitoreo y almacenamiento de información en la nube y bajo el concepto de Internet de las Cosas. Dentro de los trabajos tomados como referentes para el desarrollo de la investigación, se mencionan:

A Low-Cost, Long-Life, Drifting Sensor for Environmental Monitoring of Rivers and Estuaries<sup>67</sup>:

Uno de los campos de aplicación de los sistemas de sensores móviles, es el monitoreo de parámetros ambientales, sin embargo, debido al costo elevado de las soluciones que se ofrecen en la actualidad, la implementación de este tipo de tecnologías no se ha masificado debido a que su implementación no es escalable, en correspondencia con los costos elevados. El trabajo de investigación de los autores se orientó al desarrollo de una plataforma para la transmisión y visualización de datos en tiempo real para el monitoreo de variables ambientales en ríos y estuarios, la solución tecnológica desarrollada se caracteriza por permitir un mayor potencial para su escalabilidad debido a su bajo costo alrededor de 300 dólares<sup>68</sup>.

El proyecto desarrollado por los investigadores se denomina TasMAN (Tasmanian Marine Analysis) y partió de la necesidad de contar con sensores móviles de bajo costo con posibilidad de ampliación a gran escala en largo plazo; el estudio previo que realizaron los investigadores permitió identificar los requerimientos que debería tener un sistema para ofrecer características como<sup>69</sup>:

- Operar en ambientes fluviales/ estuarios.
- Bajo costo.
- Impacto bajo sobre el medio.
- Alto tiempo de despliegue.
- Capacidades de detección marina.
- Uso de sensor web y publicación de datos en tiempo real por medio de herramientas Cloud.

En la investigación referenciada, la característica “alto tiempo de despliegue” refiere la necesidad del dispositivo para realizar el recorrido (proceso mediante el cual el

---

<sup>67</sup> D'ESTE, Claire, et al. A Low-Cost, Long-Life, Drifting Sensor for Environmental Monitoring of Rivers and Estuaries. *En: IEEE Xplore: 2012 Oceans – Yeosu*. Mayo, 2012; p. 1-6. ISBN 978-1-4577-2091-8. DOI: 10.1109/OCEANS-Yeosu.2012.6263393.

<sup>68</sup> *Ibid.*, p. 6.

<sup>69</sup> *Ibid.*, p. 1-2.

dispositivo realiza la medición), de una forma ininterrumpida donde uno de los factores determinantes es la duración de la batería. En lo que compete a la característica: uso de sensor web y publicación de datos en tiempo real por medio de herramientas Cloud, es importante resaltar que, si bien, la solución tecnológica propuesta por los autores no se encuentra desarrollada en su totalidad, se resalta la importancia de contar con un sensor con características que permitan la emisión de alertas y ejecución de tareas, lo anterior como elemento de apoyo a toma de decisiones, modelamiento y visualización de datos.

Uno de los aspectos que resalta el desarrollo de la investigación se relaciona con la reducción de costos que se ha presentado gracias a la masificación de la tecnología de los teléfonos inteligentes, a partir de estos se tiene acceso a una cámara integrada, sistema de posicionamiento global (GPS), modem 3G, pantalla táctil, Bluetooth, tecnología inalámbrica (Wireless networking), puerto serial, acelerómetro, sensor de proximidad, lo anterior integrado en un único dispositivo, junto con tarjetas para desarrollo de bajo costo y consumo energético, se puede dar origen a sistemas de comunicación de datos a partir de los sensores, en el caso del proyecto mencionado era de interés monitorear el estado de las variables de temperatura y presión, además de un sistema de rastreo para la localización del dispositivo que incorporó el servicio de mensajería corta (SMS) a través de un red 3G para la conexión a Internet<sup>70</sup>.

Application of wireless sensor network in Yangtze River Basin water environment monitoring<sup>71</sup>:

Los autores del trabajo partieron de la necesidad de monitorear la calidad de agua de tres gargantas del embalse del río de Yangtze, que debido a su extensión requiere de tareas y procedimientos complejos, por esta razón se planteó una solución a partir de un sistema automatizado basado en redes de sensores inalámbricos para el control de la calidad del agua. El sistema desarrollado consta de los siguientes elementos<sup>72</sup>:

- Implementación de sensores inalámbricos.
- Transmisión de datos de identificación y detección de a través de una red inalámbrica basada en GPRS.
- Exactitud del monitoreo.
- Tolerancia a fallos a través de nodos redundantes.

El diseño de la solución incluye elementos de hardware y software que de forma integrada logran la ejecución de tareas de monitoreo ambiental en tiempo real. Las pruebas realizadas al sistema arrojaron que puede satisfacer la necesidad de

---

<sup>70</sup> Ibid., p. 3.

<sup>71</sup> WANG, Jing y LIU, Tingting. Application of wireless sensor network in Yangtze River Basin water environment monitoring. En: IEEE Xplore: The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC). Mayo, 2015; p. 1-5. ISBN 978-1-4799-7017-9. DOI: 10.1109/CCDC.2015.7161882.

<sup>72</sup> Ibid., p. 1-4.

monitoreo de parámetros del medio ambiente de agua en el área de embalse, en relación a las tres gargantas del río Yangtze. La estructura general del sistema muestra elementos que pueden ser considerados como referente para el desarrollo de la solución ante los requerimientos de monitoreo de la presente investigación.

Para el caso del monitoreo de parámetros de calidad en las tres gargantas del río Yangtze, el sistema propuesto, contempla el monitoreo de los siguientes parámetros de acuerdo a la normatividad establecida por la ley China, para determinación de la calidad ambiental para el agua superficial GB3838-2002<sup>73</sup>:

- Temperatura del agua
- Valor de pH
- Oxígeno disuelto
- Índice de permanganato
- Demanda química de oxígeno (DQO)
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)
- Niveles de concentración de cobre, entre otros indicadores particulares, aplicables a la región

Para el monitoreo de estos parámetros se utilizaron redes de sensores inalámbricas operando bajo una red de comunicación móvil inalámbrica GPRS para la transmisión y envío de datos hacia el centro de monitoreo; en cuanto a la topología de la red, se utilizó una red en estrella para cada uno de los tres afluentes, utilizando como protocolo para la comunicación entre los sensores y las tarjetas de adquisición, la tecnología Zigbee, para la integración de cada una de las redes de sensores individuales, compuesta por un sensor por cada uno de los tres afluentes del embalse, los autores de la investigación utilizaron una topología de red inalámbrica en malla<sup>74</sup>.

Wireless Sensor Network for River Water Quality Monitoring in India<sup>75</sup>:

Los autores desarrollaron la investigación a partir de la necesidad de contar con una herramienta para el monitoreo constante de la calidad de recurso hídrico en los ríos de India, debido a los altos niveles de contaminación generados a partir de la intervención humana<sup>76</sup>. De los cuatro casos expuestos como parte del estado del arte, éste guarda una mayor similitud con el estudio de caso seleccionado (quebrada “Las Cebollas”), los autores proponen un sistema de monitoreo inalámbrico mediante una red de sensores que permitan tareas de monitoreo remoto de la calidad del agua en India.

---

<sup>73</sup> Ibid., p. 1.

<sup>74</sup> Ibid., p. 2.

<sup>75</sup> UNNIKRIISHNA MENON, K.A, DIVYA, P y MANEESHA V, Ramesh. Wireless Sensor Network for River Water Quality Monitoring in India. En: IEEE Xplore: 2012 Third International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT'12). Julio, 2012; p. 1-7. DOI: 10.1109/ICCCNT.2012.6512437.

<sup>76</sup> Ibid., p. 1.

La investigación desarrollada por los investigadores buscó el monitoreo de pH a lo largo de diferentes puntos del río donde se encuentran ubicados fábricas, áreas residenciales y zonas de cultivos, los autores emplearon la tecnología Zigbee debido al bajo consumo energético de las tarjetas MICAz mote, empleadas para el despliegue de esta solución. Los autores proponen un modelo de cluster de nodos para el agrupamiento de la información de cada uno de los puntos de control en un único nodo raíz, es importante aclarar que para cada punto de control existe un número determinado de nodos encargados de obtener información sobre el parámetro pH<sup>77</sup>.

La información proveniente de cada uno de los nodos del cluster es centralizada en el nodo raíz, al cual se transmite en tiempo real mediante la tecnología y protocolos de transmisión ZigBee, con la posibilidad de incorporar equipos repetidores de serlo requerido para garantizar la transmisión de la información.

El módulo de comunicación utilizado para la solución propuesta fue la plataforma MICAz mote, la cual tiene como función realizar la transmisión de los datos desde el sensor hasta el cluster de nodos, la razón por la cual los autores emplean esta tarjeta es su bajo costo, su bajo consumo energético y una larga vida útil de las baterías que emplea el dispositivo. La tarjeta MICAz mote utiliza el estándar IEEE 802.15.4, opera a 2.4 GHz de la banda ISM y transmite esta información a un equipo de cómputo donde se centraliza la totalidad de los datos provenientes de cada uno de los nodos; una vez centralizada la información en un único nodo raíz, se da lugar a la generación de reportes y alertas vía correo electrónico al distrito de la autoridad de agua, control de contaminación, autoridades de salud, entre otros agentes encargados de la supervisión de niveles de contaminación<sup>78</sup>.

El prototipo de sensor requiere de la incorporación de un circuito amplificados para incrementar la ganancia en amplitud de la señal, dicho circuito fue diseñado a partir de circuitos amplificadores operacionales.

Los autores diseñaron un sistema de cuatro canales, cada uno representando la ubicación de cuatro nodos, de cada nodo depende el sistema de cuatro sensores de pH ubicados en diferentes niveles de profundidad, los canales individuales convergen en un nodo principal, el cual actúa como una estación base, este nodo principal actúa como un Gateway que centraliza los datos provenientes de los cuatro canales en un único sistema de adquisición de datos mediante el microcontrolador PIC 16F877, el cual cuenta con un módulo conversor análogo digital requerido para el acondicionamiento de la señal y la conversión de la misma a formato digital<sup>79</sup>.

El microcontrolador entrega una señal digital al módulo de comunicación inalámbrica, el cual fue diseñado a partir de plataformas Zigbee; para el caso del trabajo, los autores realizaron la configuración de la comunicación inalámbrica a

---

<sup>77</sup> Ibid., p. 3.

<sup>78</sup> Ibid., p. 4.

<sup>79</sup> Ibid., p. 4.

partir de las plataformas MicaZ mote, debido al bajo costo, el bajo consumo de potencia y el manejo de protocolos de radio frecuencia según los estándares IEEE<sup>80</sup>.

Para el desarrollo del presente trabajo, también se consideraron referentes en el campo de la modelación de los parámetros de la calidad del agua en fuentes hídricas, el proceso de revisión de la literatura especializada en este campo permitió identificar trabajos como el de la “Modelización de la calidad del agua del estero aguas Claras, cantón Quevedo, Ecuador”<sup>81</sup>, también se identificó la normatividad estandarizada para el desarrollo de procesos de medición de variables de: pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, en el agua, emitida por la Asociación Americana de Salud Pública (American Public Health Association) y contenida en el manual de procedimientos técnicos: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater<sup>82</sup>, en el cual se establecen una serie de metodologías estandarizadas para el análisis de aguas naturales, suministros de agua y aguas residuales, considerando los atributos biológicos, químicos y físicos del agua, a continuación, se describen estos referentes que se adoptaron para el diseño y desarrollo de la solución tecnológica presentada en el capítulo 7.

Modelización de la calidad del agua del estero aguas Claras, cantón Quevedo, Ecuador<sup>83</sup>:

La investigación propuesta por los autores se enfocó a realizar un estudio del impacto de las descargas de agua residual en el estero aguas Claras, ubicado en el suroeste del cantón Quevedo en Ecuador; para el estudio de caso de dicha investigación, se buscó conocer el impacto de las aguas residuales para el estado de las variables: oxígeno disuelto y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), el trabajo realizado incorporó modelos de simulación de Streeter-Phelps y el programa QUAL2K, considerando las constantes:

- Reaireación ( $k_a$ )
- Desoxigenación ( $k_d$ )
- Remoción total ( $k_r$ )

Para el análisis de los resultados, los autores emplearon la metodología GLUE, para la estimación de la probabilidad de incertidumbre generalizada, lo anterior mediante simulaciones de Monte Carlo, las simulaciones fueron realizadas en tres tramos de la corriente del estero aguas Claras<sup>84</sup>.

---

<sup>80</sup> Ibid., p. 5.

<sup>81</sup> PAZMIÑO-RODRÍGUEZ, Julio César; ZAMBRANO-GANCHOZO, Gabriela Lisseth y COELLO-BURGOS, Hevert Aarón. Modelización de la calidad del agua del estero aguas Claras, cantón Quevedo, Ecuador. *En*: DYNA, Volumen 85, Número 204, p. 204-214, 2018. ISSN electrónico 2346-2183. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.65847>.

<sup>82</sup> AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION®; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION® y WATER ENVIRONMENT FEDERATION® (Estados Unidos). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22 ed. Washington DC.: American Public Health Association. 2012. 1496 p. ISBN 9780875530130.

<sup>83</sup> PAZMIÑO-RODRÍGUEZ, Julio César; ZAMBRANO-GANCHOZO, Gabriela Lisseth y COELLO-BURGOS, Hevert Aarón. Modelización de la calidad del agua del estero aguas Claras, cantón Quevedo, Ecuador. *En*: DYNA, Volumen 85, Número 204, p. 204-214, 2018. ISSN electrónico 2346-2183. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.65847>.

<sup>84</sup> Ibid., p. 1.



Los investigadores, seleccionaron tres tramos para el muestreo a lo largo del recorrido del afluente del estero agua Claras, los tramos fueron seleccionados de acuerdo a los aportes de recurso que llegan a los mismos, se trabajó el modelo de Streeter-Phelps y una de las principales conclusiones del trabajo, sugiere que existe una alta capacidad de autodepuración del estero por los altos valores obtenidos de  $k_a$  y  $k_r$ ; el trabajo de modelización de la calidad del agua del estero aguas Claras, permitió identificar que la carga orgánica ocasionada por las descargas de las aguas residuales domiciliarias genera un porcentaje de concentración de oxígeno disuelto menor al 80%, lo cual según la normatividad ecuatoriana se encuentra por debajo del límite permitido, sin embargo, para el estudio de caso correspondiente, la investigación encontró que el estero duplica los niveles de oxígeno disuelto en los dos últimos tramos de muestreo seleccionados, gracias a su capacidad de autodepuración<sup>85</sup>.

Los resultados para las situaciones de la concentración de oxígeno disuelto en el estero aguas Claras, mostró niveles de similitud relevantes entre los QUAL2K y la modelización de Streeter-Phelps, que en los dos casos se utilizaron como métodos de predicción, evidenciando porcentajes de error menores al 40%, sin embargo, la investigación concluyó que la simulación QUAL2K, tuvo un ajuste menor, dado que no se contaba con información requerida por el software<sup>86</sup>.

Otros de los referentes, para el desarrollo del sistema para supervisar la calidad en caudales superficiales, a partir de la normatividad ambiental y bajo esquema del Internet de las Cosas, fueron las investigaciones desarrolladas por: YIHENG, Chen y DAWEI, Ha, titulada "Water quality monitoring in smart city: A pilot Project"<sup>87</sup>, y la investigación "Wireless sensor networks: A survey on monitoring water quality"<sup>88</sup>, desarrollada por PULE, Mompoloki, YAHYA, Abid y CHUMA, Joseph.

Wireless sensor networks: A survey on monitoring water quality<sup>89</sup>:

La investigación, parte de la problemática evidenciada en el surgimiento de enfermedades debido a la presencia de agentes contaminantes en el agua, lo cual lleva a la necesidad de contar con sistemas de monitoreo de los parámetros de calidad de la misma, los investigadores hacen énfasis en que los métodos de monitoreo convencionales, implican la toma de muestras en diferentes puntos de una red de distribución y sus correspondientes procesos de prueba y análisis en laboratorio; dicho sistema presenta falencias debido a que la toma de muestras y su posterior traslado al laboratorio, implica una mayor logística, un mayor tiempo

---

<sup>85</sup> Ibid., p. 10.

<sup>86</sup> Ibid., p. 10.

<sup>87</sup> YIHENG, Chen y DAWEI, Han. Water quality monitoring in smart city: A pilot Project. *En*: Automation in Construction, Volumen 85, p. 307-316. ISSN 0926-5805. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.008>.

<sup>88</sup> PULE, Mompoloki, YAHYA, Abid y CHUMA, Joseph. Wireless sensor networks: A survey on monitoring water quality. *En*: Journal of Applied Research and Technology, Volume 15, Issue 6, p. 562-570. ISSN 1665-6423. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jart.2017.07.004>.

<sup>89</sup> Ibid., p. 1.

para su ejecución y a esto se le suma el hecho que es un proceso de monitoreo que impide realizar un seguimiento en tiempo real de los parámetros de calidad del agua<sup>90</sup>, ante la necesidad de monitorear los parámetros que determinan la calidad del agua, los autores de la investigación se enfocan en el desarrollo de redes de sensores inalámbricos (WSN), las cuales presentan algunas ventajas, respecto a los sistemas de monitoreo convencionales:

- Son relativamente asequibles
- Permiten el monitoreo remoto de las variables
- Permiten monitoreo en tiempo real
- La intervención de un operario requerida es mínima

Tomando en cuenta los cuatro factores mencionados, los investigadores se trazaron como objetivo, analizar la aplicación de las redes de sensores inalámbricos (WSN), para el monitoreo de parámetros de calidad ambiental, de manera específica en lo correspondiente a los parámetros de calidad del agua, para esto, los autores proponen el monitoreo de las variables físico-químicas del agua, como lo son: pH, conductividad eléctrica, turbiedad y potencial de reducción de oxidación<sup>91</sup>, lo anterior, luego del proceso de revisión de la información y trabajos de investigación, existentes y relacionados con el tema de estudio.

Los autores del artículo mencionan diferentes estándares para la implementación de redes sensores inalámbricos, dentro de estos<sup>92</sup>:

1. La tecnología ZigBee, la cual se encuentra dentro de las aplicaciones de la especificación IEEE 802.15.4, y para los fines de WSN, este estándar permite que se configuren dispositivos inalámbricos en redes de topologías de estrella, malla y redes de árbol; con la posibilidad de manejar cientos de dispositivos con tasas de transmisión de datos alrededor de 250 kbps.

2. La tecnología BLE (Bluetooth Low Energy), es una versión de bajo consumo energético del estándar Bluetooth, que permite tasas de transferencia de información del orden de 1 Mbps para coberturas y distancias entre dispositivos entre 30 metros y 80 metros.

3. LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), tecnología diseñada para aplicaciones que requieran del envío de bajas cantidades de información entre dispositivos ubicados a grandes distancias, dentro de sus principales ventajas se relata el bajo consumo de potencia de los dispositivos de esta tecnología, lo cual proporciona altos niveles de autonomía.

4. SigFox, la primera red celular dedicada al manejo de bajos anchos de banda para la comunicación máquina a máquina, bajo el esquema del Internet de las Cosas;

---

<sup>90</sup> Ibid., p. 1.

<sup>91</sup> Ibid., p. 3.

<sup>92</sup> Ibid., p. 2.

dentro de las principales ventajas de esta tecnología se resalta su capacidad de transmitir datos a distancias hasta los 40 km en espacio abierto.

Otras de aplicaciones de los sistemas WSN resaltadas en la investigación son: monitoreo ambiental, monitoreo de calidad del aire, monitoreo de bosques, monitoreo climatológico y la ya mencionada para el monitoreo de los parámetros de calidad del agua.

Como conclusión, los autores, proponen las redes de sensores inalámbricos como una alternativa adecuada para el monitoreo y vigilancia de los parámetros de calidad del agua para fuentes que abastecen municipios, resaltan que sus mayores ventajas residen en la asequibilidad de esta tecnología y en la capacidad de realizar mediciones de forma remota y en tiempo real, sin embargo, consideran que es necesario tener en cuenta las limitaciones de potencia del sistema, memoria, ancho de banda y energía que presenta esta tecnología, dado que estos parámetros pueden afectar de manera directa el rendimiento, eficacia y eficiencia de las aplicaciones de monitoreo<sup>93</sup>.

La investigación realizada por PULE, Mompoloki, YAHYA, Abid y CHUMA, Joseph, especifica que los sistemas WSN para el monitoreo de calidad del agua manejan rango limitados, por lo cual se requiere de la implementación de nodos repetidores; dentro de las conclusiones de este trabajo se menciona que algunas arquitecturas WSN, utilizan la computación en la nube para alojar y acceder de forma remota a la información proveniente de los sensores dispuestos para el monitoreo de la calidad del agua, pero no toman alguna consideración respecto a los factores de seguridad, lo que podría suponer una debilidad del sistema al ser vulnerable ante amenazas de confiabilidad respecto a la información proveniente de los sensores que podría ser vulnerable a ciberataques.

Water quality monitoring in smart city<sup>94</sup>:

Los autores de esta investigación parten del concepto de la ciudad inteligente bajo el panorama del desarrollo urbano mediante la integración de las tecnologías de información y comunicación, los sistemas y soluciones de Big Data y el Internet de las cosas (IoT), como una herramienta de administración de los recursos de las ciudades en busca de la sostenibilidad<sup>95</sup>, y dentro de estas herramientas se destacan los sistemas de monitoreo de la calidad del agua a través de redes de sensores inalámbricos (WSN), y en el caso que compete a la investigación, los autores presentan un sistema multiparamétrico de control para la calidad del agua (Bristol Floating Harbour), que tiene la capacidad obtener datos de los parámetros de calidad del agua en tiempo real a través de herramientas en línea.

---

<sup>93</sup> Ibid., p. 6-7.

<sup>94</sup> YIHENG, Chen y DAWEL, Han. Water quality monitoring in smart city: A pilot Project. En: Automation in Construction, Volumen 85, p. 307-316. ISSN 0926-5805. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.008>.

<sup>95</sup> Ibid., p. 1.

El trabajo desarrollado por YIHENG, Chen y DAWEI, Han, titulado: “Water quality monitoring in smart city” propone una plataforma plug & play con posibilidades de construir el sistema de monitoreo del medio ambiente a través de redes inalámbricas en áreas urbanas y lo propone como un posible sistema de gestión del agua en zonas urbanas.

La investigación menciona que los procesos de estimación de la calidad del agua a través de monitoreo remoto suelen ser poco eficientes en: ríos, canales y estanques en áreas urbanas, pero a raíz del avance en las tecnologías orientadas a la construcción de ciudades inteligentes y del Internet de las Cosas, se facilita la construcción de infraestructuras de red tanto cableada como inalámbrica bajo protocolos como lo es en el caso de las tecnologías: ZigBee, Z-WAVE, INSTEON, WAVENIS, LoWPAN, NB-IoT y LoRaWAN, cuyas aplicaciones son ampliamente desarrolladas en el campo del monitoreo de parámetros ambientales<sup>96</sup>.

El sistema, objeto de estudio de la publicación de YIHENG, Chen y DAWEI, Han, es una aplicación del Internet de las Cosas, denominado BIO (Bristol Is Open), y fue desarrollado de forma colaborativa entre la Universidad de Bristol y el Ayuntamiento de Bristol, con la colaboración de las autoridades locales, sectores industriales y comunidad; el sistema BIO entrega información de carácter abierto a través de una infraestructura de tecnología de comunicaciones bajo el esquema CEaaS (City Experimentation as a Service), con el fin de abrir un espacio para la investigación dentro de la ciudad de Bristol. La infraestructura del sistema BIO fue proporcionada por “City Operating System” que provee al sistema de nodos activos, equipados con plataformas de Hardware de acceso abierto a infraestructuras y a la experimentación con otras plataformas de Hardware y Software, el sistema también cuenta con nodos inalámbricos que integran tecnologías móviles y Wi-Fi, con conexión directa a redes ópticas; BIO, cuenta con módulos de adquisición de datos ubicados In-Situ, los cuales son<sup>97</sup>:

–Aqua Troll 600: sonda de prueba multi-parámetro para medición de la calidad de agua, esta sonda puede realizar la medición de variables de pH, potencial de reducción de oxidación, oxígeno disuelto y la turbidez.

–Hikvision IP Network Camera DS-2CD2042WD-I: utilizada para capturar imágenes de la superficie del agua a 720 p y 6 fps.

El módulo para el suministro de energía para el sistema está compuesto por un panel solar, un controlador de carga para panel solar y una batería de ácido sólido y el módulo para transmisión de datos está conformado por un servidor serial a Wi-Fi (USR-WIFI232-630), el cual permite la transmisión de la información a través de una red inalámbrica construida bajo los protocolos TCP/IP. El sistema BIO incluye una aplicación de una máquina virtual encargada de hacer peticiones de la información proveniente de la sonda de medición cada 15 minutos, guardar dicha información (datos de las variables de la calidad del agua) en un archivo de formato

---

<sup>96</sup> Ibid., p. 1.

<sup>97</sup> Ibid., p. 4-6.

CSV, enviar la información a un servicio de base de datos y, transmitir y grabar video desde la cámara, el servicio de base de datos utilizado para el caso de BIO, fue InfluxDB y la aplicación de usuario fue desplegada desde la plataforma Grafana para visualización en Web GUI.

Como conclusiones, los autores resaltan que el sistema BIO es un sistema de monitoreo en tiempo real basado en el modelo WSN que cubre la totalidad de las actividades requeridas para la estimación de la calidad, por lo tanto, se sugiere que las soluciones de tipo WSN sean incorporadas como alternativas tecnológicas para los modelos de ciudades inteligentes que se buscan desarrollar en la actualidad.

Una de las ventajas del sistema BIO radica en que utiliza código abierto y las herramientas InfluxDB y Grafana como herramientas de almacenamiento de datos visualización de los mismos, el uso de estas dos herramientas minimizó el costo y el esfuerzo para el desarrollo del Software y optimizo el sistema dado que se logró la integración de las aplicaciones y herramientas utilizadas con los sensores convencionales a través de protocolos de conexión a través de internet. El sistema permite el despliegue de altas frecuencias de muestreo, pero las principales ventajas del sistema BIO son: bajo costo de implementación y posibilidad de obtener lecturas en tiempo real y accesibles a través de aplicaciones desplegadas en una página web<sup>98</sup>.

---

<sup>98</sup> Ibid., p. 9.

### 3. SOLUCIÓN TECNOLÓGICA

La solución tecnológica desarrollada se derivó del planteamiento de necesidad de contar con herramientas tecnológicas para desarrollar tareas de monitoreo en tiempo real de los parámetros de calidad del recurso hídrico, con el fin de determinar el nivel de impacto que tienen los rellenos sanitarios en las zonas circundantes a los afluentes hídricos.

Este capítulo, incluye dos aspectos bajo los cuales se desarrolló el presente trabajo, el primero se relaciona con la metodología utilizada para la selección del estudio de caso de caso, y el segundo con el desarrollo tecnológico y de ingeniería diseñado para abordar la problemática y ofrecer la alternativa para su solución.

#### 3.1. METODOLOGÍA PARA SELECCIÓN DEL ESTUDIO DE CASO

Para la selección y desarrollo del estudio de caso, se tomó como referente, la Metodología para el desarrollo de estudios de caso, propuesta por STOTT, Leda y RAMIL, Xosé<sup>99</sup>, cuya aplicación se describe a continuación.

Paso 1: Iniciación del trabajo:

En correspondencia con la metodología, en este paso se integran la pregunta de investigación, hipótesis y objetivos, que han sido expuestos en un apartado previo.

Paso 2: Selección de los casos:

Para la selección de los casos se emplearon seis indicadores generales, los cuales son zona geográfica, área temática, tamaño, cobertura y alcance, modo de intervenir y resultados e impacto; la Tabla 13 incluye estos indicadores para el caso específico que compete al trabajo.

Tabla 13. Selección del caso para el desarrollo del trabajo.

Indicador	Aspectos considerados	Caso seleccionado	Descripción de la situación
Zona geográfica	Departamento de Boyacá, Provincia centro del Departamento de Boyacá, Ciudad de Tunja y sus veredas y municipios limítrofes.	Vereda de Pírgua, de la ciudad de Tunja	En la zona geográfica elegida se encuentra el cauce la quebrada “Las Cebollas”, que abastece en parte al acueducto del Municipio de Oicatá, en la zona circundante a la quebrada, se encuentra ubicado el relleno sanitario de Pírgua, que podría llegar a ser una fuente de contaminación para el citado recurso hídrico.
Área temática	Sistemas de monitoreo de calidad del agua, Internet de las Cosas, y	Monitoreo de los parámetros físico-químicos para la	Según la normatividad colombiana vigente, las variables mencionadas, son parámetros a partir de los cuales se

<sup>99</sup> STOTT, Leda y RAMIL, Xosé. Metodología para el desarrollo de estudios de caso. Madrid.: Centro de Innovación Tecnológica para el Desarrollo Humano Universidad Politécnica de Madrid, 2014. 35 p.

Indicador	Aspectos considerados	Caso seleccionado	Descripción de la situación
	normatividad ambiental colombiana.	determinación de la calidad del agua: pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto.	puede estimar la calidad del recurso hídrico. Se realiza la propuesta de monitoreo automático puntual, por medio de la tecnología del Internet de las Cosas, siguiendo los parámetros establecidos para los sistemas WSN.
Tamaño	Integración de espacios académicos con sectores de la autoridad ambiental y entidades con responsabilidad en el manejo sanitario de la región.	Personal de desarrollo por parte de la Facultad de Ingeniería de la UPTC-Tunja, participación de autoridades ambientales de la región y operador del relleno sanitario de Pírgua.	Desarrollo de un prototipo funcional, con capacidad de transferencia a otros estudios de caso.
Cobertura y alcance	Prototipo funcional de Sistema IoT para el monitoreo y reporte de parámetros de calidad del recurso hídrico.	Caracterización de la zona de la quebrada “Las Cebollas” en la zona circundante a la ubicación del relleno sanitario de Pírgua.	Se busca el desarrollo de un sistema y prototipo, con el objeto de ofrecer un sistema de apoyo y herramienta de trabajo, que podría ser incorporada dentro de los esquemas de trabajo de las entidades encargadas de supervisar la calidad del recurso hídrico.
Modo de intervenir	Afluente de la quebrada “Las Cebollas”, posición geográfica del relleno sanitario de “Pírgua” y sistemas de monitoreo puntuales y automáticos.	Disposición de tres estaciones de monitoreo para realizar mediciones automáticas puntuales.	Se procede a caracterizar el entorno de la quebrada “Las Cebollas”, en la zona circundante al relleno sanitario de “Pírgua”, con el objetivo de establecer tres puntos de monitoreo, ubicados antes y después de la zona de influencia del relleno sanitario, y en la zona geográfica donde podría inferirse una posible influencia del relleno sanitario sobre el recurso hídrico.
Resultados e impacto	Fomento de la investigación y transferencia de conocimiento interdisciplinar mediante la participación y aportes de los grupos TELEMATICS (Grupo de Investigación en Telemática y TIC aplicada a la Educación) y GISABA (Grupo de Investigación en Sostenibilidad Ambiental, Biodiversidad y Agroecología).	El trabajo podrá ser incorporado en un futuro por los agentes: ServiTunja como operador del relleno sanitario de Pírgua y CorpoBoyacá como autoridad ambiental para la región, en correspondencia con el estudio de caso.	Se pretende aportar soluciones a problemáticas de la región en el campo de la medición de parámetros de calidad del recurso hídrico, que en el estudio de caso se seleccionó.

Fuente: Autor e investigadores.

### 3.2. CARACTERIZACIÓN DEL ESTUDIO DE CASO

El estudio de caso (Tabla 13) corresponde a la quebrada “Las Cebollas”, en la zona circundante al relleno sanitario de Pírgua, ubicado en la vereda que recibe el mismo nombre, y la cual pertenece a la ciudad de Tunja, junto con otros afluentes del recurso hídrico, abastece de este recurso al municipio de Oicatá. El nacimiento de la quebrada “Las Cebollas” se registra aguas arriba del relleno sanitario de Pírgua. La siguiente figura ilustra la posición geográfica del relleno sanitario y de la quebrada, elementos bajos los cuales se desarrolla la solución tecnología propuesta para el monitoreo de los parámetros de calidad del recurso hídrico.

Figura 2. Ubicación geográfica del estudio de caso



Fuente: Autor e investigadores.

El equipo de trabajo de los grupos de investigación TELEMATICS y GISABA realizó la actividad de inspección in situ de la zona geográfica de la quebrada respecto a la ubicación del relleno sanitario, con el objetivo de identificar las características ambientales del tramo objeto de estudio de la Quebrada “Las Cebollas”; esta revisión permitió identificar las siguientes características de la zona de trabajo; la Figura 3 presenta la ubicación de los puntos referenciados en los resultados de la observación de la zona geográfica en la cual se ubica el estudio de caso y cuyas observaciones se incluyen en la Tabla 14.

Figura 3. Registro y caracterización de la Quebrada “Las Cebollas”



Fuente: Autor e investigadores.



A partir de la visita al sitio correspondiente al estudio de caso, se identificaron los siguientes parámetros, que a su vez sirvieron para determinar los tres puntos para el despliegue del monitoreo automático y puntual.

Tabla 14. Registro de caracterización de la Quebrada “Las Cebollas”

Punto	Ubicación geográfica (Coordenadas)	Elevación (metros)	Observación y comentarios de caracterización.
1	5.5805774, -73.319466	2657	Punto de contacto de la Quebrada Las Cebollas con carretera que conduce de Tunja a Oicatá. Emplazamiento adecuado para fijar una Estación (Punto de Monitoreo).
2	5.5805407, -73.31945	2659	Vertimiento
3	5.5805416, -73.319435	2657	Vertimiento
4	5.580347, -73.318886	2655	Cambio de sección del canal
5	5.579842, -73.318596	2652	Conjunto de captaciones visibles
6	5.579624, -73.31841	2654	Mangueras de diferentes diámetros que llegan a la quebrada
7	5.5795717, -73.318344	2657	Vertimiento presumiblemente de un pozo séptico
8	5.579842, -73.31713	2664	Reservorio
9	5.5797553, -73.316925	2668	Concentración de materia orgánica
10	5.579704, -73.31685	2659	Cambio de características visuales en la turbiedad del agua (10 metros arriba de la materia orgánica). Aparición de basuras tipo poliestireno expandido en el cauce
11	5.5796595, -73.316666	2661	Pastoreo en la ronda de la quebrada
12	5.5794816, -73.3165	2657	Paso de ganado a través de la quebrada
13	5.5791125, -73.31645	2661	Concentración de hierro a juzgar por la coloración de rocas en la quebrada
14	5.57848, -73.316185	2666	Paso de ganado a través de la quebrada
15	5.578288, -73.31609	2670	Concentración de hierro a juzgar por la coloración de rocas en la quebrada
16	5.5782347, -73.31608	2667	Cambio en la coloración y olor
17	5.578106, -73.31606	2671	Turbiedad en el agua

Fuente: Trabajo de campo TELEMATICS y GISABA.

Como observaciones generales respecto a la caracterización del terreno de la quebrada “Las Cebollas” en la zona circundante al relleno sanitario de Pírgua, se resaltan los siguientes aspectos:

–La zona se caracteriza por terrenos circundantes en mayor medida dedicados al pastoreo y la quebrada se convierte en bebedero natural para los semovientes, que en ciertos puntos transitan sobre ella, dado su trazado.

–La quebrada en su trazado no registra aperturas superiores a 1,5 metros y su profundidad varía desde 0,3 hasta 0,8 metros.

–En la zona de la quebrada, se encuentran fincas aledañas con casas alejadas de la quebrada en longitudes que superan los 150 metros lineales, tramo en los cuales no se aprecian cultivos, no obstante, es común encontrar en el recorrido diferentes mangueras de distintos diámetros dentro del cauce de la quebrada a lo largo de todo el trazado, lo que permite inferir la captación y traslado del fuido para actividades no específicas.

–Existen diferentes puntos con basuras de difícil degradación.

-Se evidencia que la quebrada en el recorrido realizado (1 kilómetro aguas arriba) presenta variaciones tanto en la coloración como en el olor, y en dos puntos específicos turbiedades no comunes para las características generales de esta fuente hídrica, lo que eventualmente puede derivarse de ciertos vertimientos que ameritarían análisis particulares.

Para realizar el monitoreo automático y puntual, se determinaron puntos específicos para la ubicación de los emplazamientos, a partir de la actividad de reconocimiento del entorno de la zona de estudio, se definió en el análisis desde la perspectiva ambiental, que era necesario establecer tres puntos de monitoreo conservando los siguientes criterios:

- Un punto aguas arriba, en una zona previa a la influencia del Relleno Sanitario de Pirgua.
- Un punto en la zona de influencia del Relleno Sanitario de Pirgua.
- Un punto aguas abajo fuera de la zona de influencia (inmediata) del Relleno Sanitario de Pirgua.

Por esta razón, fueron establecidos como emplazamientos para el monitoreo los puntos A, B y C, rotulados en la Figura 3. El primer punto de control (A) se ubicó antes de la zona de influencia del relleno sanitario de Pirgua sobre la quebrada, en las coordenadas 5.5770974, -73.31496 a una elevación de 2721 metros; el segundo punto de control (B), se ubicó en las coordenadas 5.5791125, -73.31645 a 2661 metros sobre el nivel del mar, ésta ubicación corresponde a la zona de influencia del relleno sanitario sobre el afluente de la quebrada; el tercer punto de control (C) se ubicó después de la zona de influencia del relleno de Pirgua en las coordenadas 5.579799, -73.318565 a 2660 metros sobre el nivel del mar, la ubicación de las estaciones de monitoreo ubicadas en campo, se presentan en la Figura 4.

Figura 4. Ubicación de las estaciones de monitoreo.



Fuente: Autor e investigadores.

### 3.3. PROTOCOLO DE MUESTREO

Para el desarrollo del protocolo de muestreo en el cauce de la quebrada “Las Cebollas”, se tomó como referente la “Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas”, publicada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el cual a su vez fue establecido para dar cumplimiento a los requisitos determinados en el Decreto 3100 de Octubre de 2003, el cual especifica: “Por medio del cual se reglamenta las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales”, en lo referente a las actividades de muestreo, análisis de muestras y programas de monitoreo de fuentes hídricas<sup>100</sup>.

Es importante mencionar que la guía publicada por el IDEAM, incorpora los métodos y estándares internacionales dispuestos en materia de parámetros de programas de monitoreo, muestreo y análisis de muestras, los cuales están definidos en Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater<sup>101</sup>, libro guía de estándares y metodologías para el análisis de los parámetros del agua, publicado por la Asociación Americana de Salud Pública (APHA).

A partir de la selección del estudio de caso de caso, y la consideración de los parámetros legales y científicos en el campo del monitoreo de parámetros de calidad del agua, se define en primera instancia la justificación para establecer un programa de monitoreo de parámetros de calidad del agua (pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica) en el cauce de la quebrada “Las Cebollas”, considerando la posible afectación del relleno Sanitario de Pírgua sobre el mismo.

#### 3.3.1 Justificación para Establecer un Programa de Monitoreo.

A partir del estudio de caso, la razón para establecer un plan de monitoreo a través de una solución tecnológica, se justifica a partir de la necesidad de verificar si los parámetros de calidad del recurso hídrico de la quebrada, cumplen con las condiciones para los usos requeridos, mediante la determinación del comportamiento de las variables: pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica, las cuales son parte de los indicadores de calidad del ambiente acuático de la quebrada; lo anterior con el fin de lograr determinar el nivel de afectación del relleno sanitario de Pírgua u otras fuentes de contaminación mediante posibles vertimientos de agentes contaminantes por actividades humanas.

---

<sup>100</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 3100 (30, octubre, 2003). Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2003. no. 45357. p. 1-13.

<sup>101</sup> AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION®; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION® y WATER ENVIRONMENT FEDERATION® (Estados Unidos). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22 ed. Washington DC.: American Public Health Association. 2012. 1496 p. ISBN 9780875530130.

### 3.3.2 Requerimientos para la Implementación de la Solución Tecnológica.

Considerando que el agua proveniente de la quebrada “Las Cebollas”, es utilizada para abastecer el acueducto del municipio de Oicatá (Boyacá), el trabajo desarrollado genera una solución tecnológica como posible herramienta para la autoridad ambiental regional, que permita la toma de decisiones a nivel de acciones de control, ya que mediante el monitoreo de las variables ya mencionadas (pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica) permite obtener una estimación de la calidad del recurso hídrico de la quebrada y de los posibles agentes contaminantes. El monitoreo de las tres variables seleccionadas para el estudio de caso, podrá ser utilizada por la autoridad ambiental para:

- Determinar el grado de afectación de la calidad del agua por procesos naturales
- Determinar la efectividad de las estrategias de control y de las acciones de gestión en el manejo de la calidad del agua, implementadas por la administración del relleno Sanitario de Pírgua
- Identificar posibles afectaciones de la calidad del agua partir de la influencia de los habitantes de las zonas circundantes al cauce de la quebrada
- Programar y ejecutar acciones de control para mejorar y prevenir afectaciones de la calidad del agua
- Identificación riesgos potenciales a partir del estado de los parámetros de calidad del agua de la quebrada “Las Cebollas”

### 3.3.3 Determinación de Objetivos del Monitoreo en la Quebrada “Las Cebollas”.

A partir de los conceptos se adoptaron algunos objetivos puntuales para el desarrollo de la solución tecnológica para el monitoreo de las variables: pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica, siguiendo los lineamientos establecidos por la Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas del IDEAM, estos objetivos considerados para desarrollar el prototipo de Sistema IoT para el monitoreo de las variables, son:

- Seguimiento del recurso: como herramienta para el diagnóstico del estado del recurso hídrico de la quebrada, lo cual permitirá a la autoridad ambiental evaluar tendencias en tiempo real y podrá constituirse en una herramienta de seguimiento de datos históricos del comportamiento de las variables seleccionadas en el estudio de caso.
- Control y vigilancia: la solución tecnológica basada en IoT, podrá ser incorporada como herramienta de trabajo por parte de la autoridad ambiental, en la medida que el prototipo para el monitoreo permite conocer el estado de las variables en tiempo real en los tres puntos de monitoreo seleccionados para el cauce de la quebrada, en la cual se pueden evidenciar algunas fuentes de vertimientos por parte de los pobladores de la zona y un posible

agente de contaminación por parte de la actividad del relleno sanitario de Pirgua en la zona circundante a la quebrada.

#### 3.3.4 Consideraciones para el despliegue de la solución de monitoreo.

Dado que las variables de pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica, pueden variar debido a distintos fenómenos, se requiere contar con una herramienta para el monitoreo en tiempo real de su estado; por lo tanto, en primera instancia se determinaron los tres puntos de monitoreo a lo largo del cauce de la quebrada “Las Cebollas”, tomando como punto de referencia su ubicación geográfica respecto a la ubicación del relleno sanitario de Pirgua, los puntos elegidos para el monitoreo, se presentan en el siguiente título.

#### 3.3.5 Factores sobre la ubicación de estaciones de monitoreo.

La siguiente figura, presenta la ubicación geográfica del Relleno Sanitario de Pirgua y de la quebrada “Las Cebollas”, los puntos indicados A, B y C, corresponden a los sitios elegidos para la ubicación de las estaciones de monitoreo.

Para la selección de los tres puntos geográficos para el monitoreo, se tuvo en cuenta que se trata de un sistema de monitoreo para una fuente de agua superficial, considerando factores estructurales, condicionantes y limitantes, los cuales se mencionan a continuación.

- Factor estructural: se tuvo en cuenta la ubicación del cauce de la quebrada respecto al relleno sanitario.
- Factor condicionante: dado que en la zona pertinente al estudio de caso convergen propiedades privadas, zonas de tránsito público, zonas de pastoreo y zonas de disposición de residuos orgánicos, los puntos de monitoreo A, B y C se eligieron tomando en cuenta que los mismos fueran de fácil acceso y disposición de los equipos. También considerando factores de seguridad se eligieron zonas a campo abierto y de fácil supervisión por parte de los investigadores involucrados en el trabajo.
- Factor limitante: se considera una limitación la necesidad de contar con personal para supervisar la seguridad e integridad estructural de las estaciones de monitoreo, dadas las consideraciones de ubicación de los puntos y según lo expuesto como factor condicionante, se requiere de personal de supervisión durante el tiempo que las estaciones de monitoreo estén dispuestas en campo.

#### 3.3.6 Puntos de Muestreo.

Con el fin de contar con una herramienta para el monitoreo, que a su vez pueda llegar a ser utilizada como elemento para la toma de decisiones por parte de la autoridad ambiental, fue necesario realizar una caracterización del cauce de la

quebrada “Las Cebollas”, a lo largo de la misma en la zona presentada en la Figura 4; a continuación, se incluye la caracterización del recurso hídrico en cuestión abarcando el recorrido desde el punto A hasta el punto B.

### 3.3.7 Selección del Tipo de Muestreo.

Considerando que la autoridad ambiental requiere de una solución tecnológica, que se propone desde la perspectiva de la apropiación del Internet de las Cosas, para realizar en monitoreo en tiempo real del estado de las variables de pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica, que son parámetros considerados por la normatividad colombiana para establecer la calidad del agua, fue necesario adoptar un muestreo automático.

### 3.3.8 Parámetros de Elección de Muestreo Automático.

Aunque el lugar geográfico del cauce de la quebrada “Las Cebollas” en el área circundante al Relleno Sanitario de Pírgua es de fácil acceso, lo cual podría sugerir la adopción de un tipo de muestreo manual, se decidió adoptar el muestreo automático, al contar con dispositivos e instrumentos propios de la instrumentación electrónica que permiten la toma de mediciones con mayor precisión y menores dificultades logísticas en comparación de la necesidad de traslado de muestras al laboratorio, que supera el parámetro máximo de 0.25 horas para el caso del análisis del pH, lo anterior según lo establecido por la guía de procedimientos y metodología para análisis de agua, establecidos en Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater<sup>102</sup>.

El muestreo automático, implicó la instalación de estaciones de monitoreo dotadas de fuentes de poder (baterías  $V_{DC}$ ) elementos primarios de medición, dispositivos electrónicos para acondicionamiento de señal y plataformas para desarrollo y despliegue de la solución de comunicación inalámbrica y transferencia de datos, que para el caso del presente trabajo se diseñó desde la perspectiva IoT.

Para la disposición de los equipos y sistemas electrónicos de las estaciones, de forma previa se requiere desarrollar procesos de calibración de los instrumentos primarios de medición (sonda de pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica) y de los circuitos respectivos para el acondicionamiento de la señal, este procedimiento se describe en el capítulo correspondiente al desarrollo tecnológico, en los apartados correspondientes a los protocolos de calibración para cada uno de los instrumentos de medición, es importante resaltar que en este mismo capítulo se incluyen los parámetros considerados para la elección de los instrumentos de medición y las plataformas para el desarrollo del prototipo propuesto.

---

<sup>102</sup> AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION®; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION® y WATER ENVIRONMENT FEDERATION® (Estados Unidos). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22 ed. Washington DC.: American Public Health Association. 2012. 1496 p. ISBN 9780875530130.

### 3.3.9 Selección de Tipo de Muestra y Frecuencia de Muestreo.

#### Tipo de muestra:

Para el monitoreo de parámetros de calidad del agua, se adoptaron las normas legales vigentes en el país y las disposiciones trazadas por el IDEAM, que en el documento “Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas”, establece los siguientes tipos de monitoreo.

- Muestra puntual
- Muestra compuesta
- Muestra integrada

Se define como muestra puntual, aquella que es tomada en un punto representativo en un determinado momento, mientras que la muestra compuesta, hace referencia a varias muestras puntuales de la misma fuente en intervalos programados y periodos determinados; la muestra compuesta hace referencia a la integración de muestras puntuales y compuestas, se aclara que estas definiciones tomadas por la “Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas”, son abstraídas del Decreto 3100 del 30 de octubre de 2003 “Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones”<sup>103</sup>.

#### Frecuencia de monitoreo:

La normatividad vigente, trazada por el Decreto 3100 del 30 de octubre de 2003<sup>104</sup>, y el documento guía del IDEAM<sup>105</sup>, recomiendan tomar muestras por tiempos determinados, por ejemplo 24 horas, donde las muestras puntuales sean cada una, dos, cuatro o seis horas; la norma determina que si el objetivo del muestreo es realizar un seguimiento o un modelamiento de los parámetros de calidad del agua en el afluente, es necesario conocer el comportamiento estacional de las variables a través del tiempo en diferentes puntos seleccionados, y para esto define que deben tomarse muestras de mínimo dos a cuatro veces al año.

Teniendo en cuenta que se eligió un tipo de muestra puntual, se eligió tomar muestras cada minuto para ser reportadas a la solución tecnológica de monitoreo, debido a las características de diseño y despliegue tecnológico del prototipo propuesto, se configura el muestreo automático, puntual con toma de muestras cada minuto.

---

<sup>103</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 3100 (30, octubre, 2003). Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2003. no. 45357. p. 1-13.

<sup>104</sup> *Ibíd.*, p. 1.

<sup>105</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (Colombia). Selección del sitio de muestreo. En: Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. Bogotá. IDEAM. 2004. p. 9-10.

### 3.3.10 Consideraciones para la Medición en Campo.

Para el estudio de caso que compete al presente trabajo, se eligieron las variables: pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica, esto implicó la selección de instrumentos de medición (sondas), cuyas características permitieran la medición continua y condiciones de inmersión total en el agua. Para lo descrito, se eligieron los instrumentos del fabricante Atlas Scientific™ de la serie Environmental Robotics, los cuales cuentan con la certificación RoHS, que garantiza que el instrumento de medición y sus correspondientes circuito de acondicionamiento cumplen con la directiva de la Unión Europea- Directiva 2011/65/EU<sup>106</sup>, también conocida como directiva RoHS, y cuyo objeto es garantizar la reducción de sustancias consideradas como peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos, los parámetros y características estáticas de los instrumentos seleccionados se incluyen en el capítulo correspondiente al desarrollo tecnológico.

### 3.3.11 Procedimiento y Protocolo para Toma de Muestras.

Para realizar el muestreo puntual en cada uno de los puntos A, B y C, se desarrollan los siguientes procedimientos:

- Calibración de instrumentos de medición y circuito de acondicionamiento, esta se realiza cada vez que se va a proceder a ubicar las estaciones de monitoreo en campo, aunque podría realizarse una vez cada seis meses como lo establece el fabricante.
  - Ajuste y configuración de plataformas para comunicación inalámbrica de estaciones de monitoreo A, B y C, ubicadas in situ con estación central también ubicada in situ.
  - Instalación en campo de la estación central de monitoreo.
  - Instalación en campo de estaciones de monitoreo en los puntos A, B y C, y activación de fuente de alimentación para cada una de las mismas.
  - Verificación de operación del sistema a través de validaciones en las plataformas y herramientas web implementadas.
  - Verificación de registro y toma de datos a través de interfaz de usuario en tiempo real.
- En cualquier momento, ya sea durante el tiempo de trabajo de las estaciones de monitoreo, o cuando las mismas no se encuentren en operación, el usuario podrá descargar el historial de datos del comportamiento de las variables de: pH, oxígeno disuelto o conductividad eléctrica, según las necesidades de análisis, supervisión y control por parte de la autoridad ambiental o por parte del operador de relleno sanitario.

---

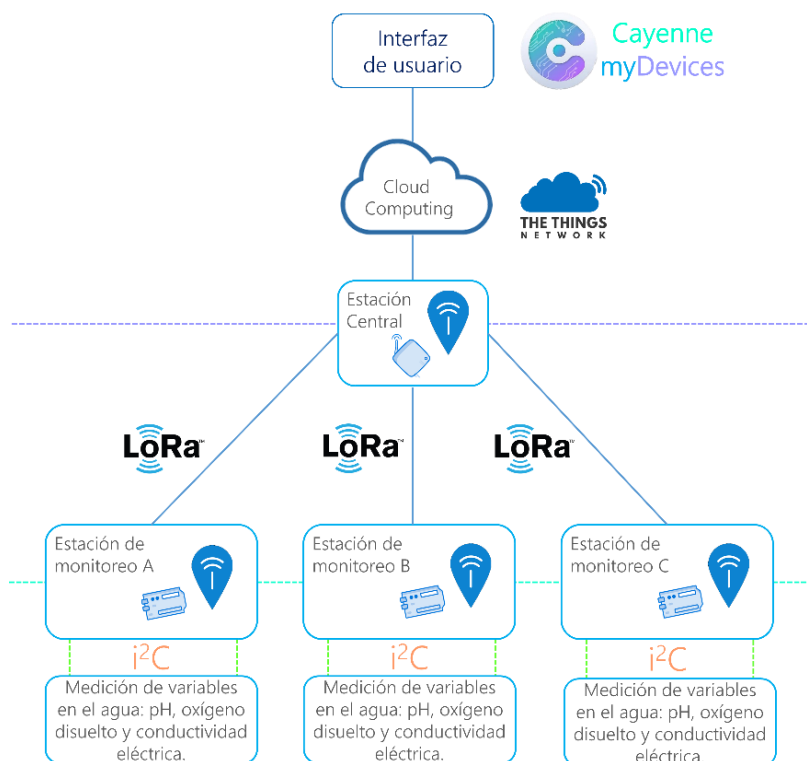
<sup>106</sup> UNIÓN EUROPEA. PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO. Directiva 2011/65/UE (8, junio, 2011). Sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos. Diario Oficial de la Unión Europea. Estrasburgo, 2011. no. L 174. p. 1-116.



### 3.4. DISEÑO TECNOLÓGICO

Para el desarrollo de la solución tecnológica se eligieron tres puntos de monitoreo a lo largo del cauce de la quebrada “Las Cebollas” para inspeccionar las variables requeridas y así determinar la calidad del agua, la siguiente figura presenta el esquema general de la arquitectura del sistema implementado.

Figura 5. Diagrama de la solución tecnológica implementada



Fuente: Autor e investigadores.

#### 3.4.1 Ubicación Geográfica de las Estaciones de Monitoreo.

La solución tecnológica propuesta, para el monitoreo de los parámetros de calidad del recurso hídrico de la quebrada “Las Cebollas”, en el área circundante del Relleno Sanitario de Pírgua, se compone de tres estaciones de monitoreo ubicadas a lo largo del cauce de la quebrada, como se mencionó en el apartado anterior, las estaciones de monitoreo se ubicaron en las siguientes coordenadas:

- Punto “A”: ubicada, aguas arriba, en las coordenadas 5.5770974, -73.31496 a una elevación de 2721 metros, esta es una ubicación geográfica previa a la influencia del Relleno Sanitario de Pírgua sobre la quebrada “Las Cebollas”

- Punto “B”: ubicada, en las coordenadas 5.5791125, -73.31645 a una elevación de 2661 metros, esta es una ubicación geográfica dentro de la zona de influencia del Relleno Sanitario de Pírgua sobre la quebrada “Las Cebollas”.

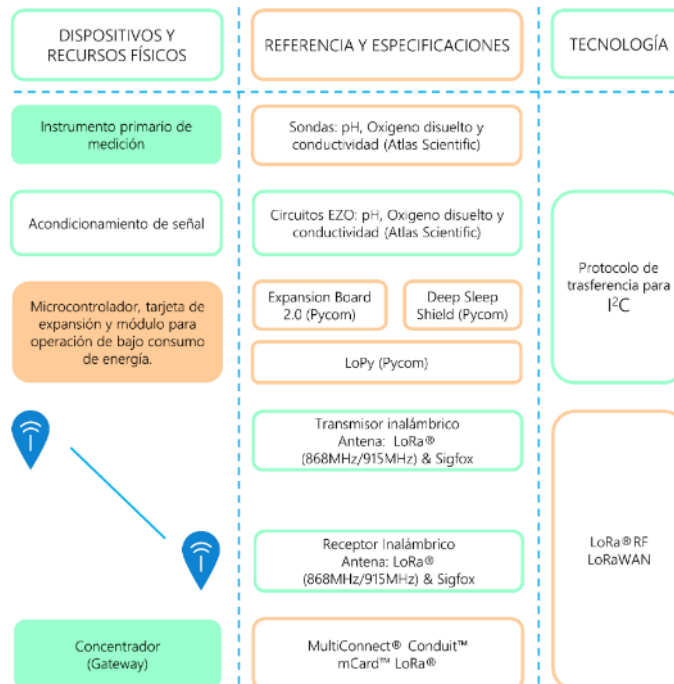
- Punto “C”: ubicada, en las coordenadas 5.579799, -73.318565 a una elevación de 2660 metros, esta es una ubicación geográfica fuera de la zona de influencia (inmediata) del Relleno Sanitario de Pírgua, respecto a la quebrada “Las Cebollas”.

Previamente, la figura 4, presentó la ubicación en terreno de las estaciones para realizar el monitoreo de los parámetros de calidad del agua a lo largo del cauce de la quebrada “Las Cebollas”, respecto a la ubicación del relleno sanitario de Pírgua.

### 3.4.2 Estructura de las Estaciones de Monitoreo.

Cada una de las estaciones de monitoreo A, B y C, están aprovisionadas de dispositivos de instrumentación electrónica como: instrumentos primarios de medición, circuitos electrónicos para acondicionamiento de señal, microcontrolador y módulo de comunicación inalámbrica, la siguiente figura muestra la relación de los dispositivos y recursos físicos, la referencia y especificaciones seleccionadas para la construcción de las estaciones y la tecnología de los dispositivos.

Figura 6. Estructura de las estaciones de monitoreo



Fuente: Autor e investigadores

La figura anterior presenta de manera general la información de los dispositivos que conforman cada una de las estaciones de monitoreo, en la siguiente sección se

describe de forma detallada la relación de los dispositivos empleados y la función que cumplen dentro del esquema de la solución tecnológica propuesta.

A partir del objetivo específico: Identificar las variables susceptibles de monitoreo de la calidad del agua en la fuente hídrica seleccionada como estudio de caso, desde la perspectiva de los instrumentos de medición por medio de sensores IoT, en virtud de los parámetros normativos, se realizaron las siguientes actividades, tomando en cuenta el diagrama general presentado en la figura 2, se determinó que para el diseño de cada estación de monitoreo deben considerar los siguientes elementos:

- Identificar las variables susceptibles de medición en campo, involucradas en el estudio de caso.
- Seleccionar los elementos primarios de medición.
- Circuitos para acondicionamiento de señal (conversión a tipo de señal adecuado y para obtención de nivel de señal adecuado entre las sondas de medición y el microcontrolador).
- Selección de circuitos y plataformas para adquisición de datos (DAQ).
- Identificación de tecnologías y plataformas para la transmisión de señal.
- Estructura física de las estaciones de monitoreo.
- Documentación y estructura del sistema físico.

### 3.4.3 Variables Susceptibles de Medición en Campo para el Estudio de Caso.

El prototipo de solución tecnológica propuesto para el estudio de caso, partió de la identificación de las variables involucradas en la determinación de la calidad del recurso hídrico en acuíferos circundantes a los lugares de disposición final de residuos sólidos, la revisión previa permitió identificar las normas y las variables allí consideradas por la legislación colombiana, estas variables y las frecuencias de monitoreo mínimas requeridas por la ley; luego de identificar estos parámetros se procedió a identificar las variables susceptibles de medición mediante instrumentos sensores ubicados in situ, así como las variables que requieren procedimientos de análisis en laboratorio. La siguiente tabla, muestra la relación de las variables y los métodos requeridos para su medición:

Tabla 15. Métodos de medición para variables de calidad del recurso hídrico

MÉTODO DE MEDICIÓN	
In situ	In vitro
pH	Metales pesados
Conductividad eléctrica	Amoníaco
Oxígeno disuelto	Nitritos
DQO	Nitratos

Fuente: Autor e investigadores.

Para el diseño y construcción del prototipo, se eligieron las variables: pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, el sistema contempla tres estaciones de monitoreo en campo, cada una se comunica con una estación principal, que a su

vez trasfiere la información proveniente de cada estación de monitoreo a un sistema de información, lo anterior permite generar reportes de incidencias que podrían ser reportadas a la autoridad ambiental y al operador del relleno sanitario de Pírgua, en el momento en que decidan hacer uso de la solución tecnológica propuesta.

#### 3.4.4 Dispositivos de Medición y Circuitos para Acondicionamiento de Señal.

Luego de identificar las variables susceptibles de medición, se seleccionaron los sensores, previa identificación de las sondas de medición y los circuitos requeridos para el acondicionamiento de la señal, las sondas de medición que se eligieron permiten realizar medición continua, estando sumergidas hasta un periodo de 6 meses, antes de requerir procedimientos de ajuste y calibración.

##### Instrumentos para medición de pH:

A partir del contexto antes establecido, basado en que la medición de variables se realizaría in situ y de forma automática, se descartó el método tradicional de medición de PH con papel tornasol, para asumir sensores de sonda de electrodo de vidrio. Realizando una revisión de los instrumentos de medición disponibles en el mercado, para la medición de pH, se identificaron los fabricantes: Mettler Toledo y Atlas Scientific Environmental Robotics, de los cuales el segundo se especializa en la fabricación de dispositivos de medición de la gama denominada: robótica ambiental, considerando los parámetros del estudio de caso y el costo de adquisición en comparación con otros disponibles en el mercado, se optó por adquirir los sensores, circuitos de acondicionamiento de señal y accesorios del fabricante Atlas Scientific Environmental Robotics.

La siguiente tabla muestra las características de la sonda de medición de pH y el correspondiente circuito para el acondicionamiento de señal, que en este caso corresponde a un circuito para convertir la señal análoga entregada por la sonda, a un tipo de tipo de señal digital que se puede comunicar ya sea a través de UART o I<sup>2</sup>C con el microcontrolador.

Tabla 16. Instrumentos para medición de pH

INSTRUMENTO / DISPOSITIVO	CARACTERÍSTICAS REQUERIDAS	
Sonda para medición de pH  Fabricante: Atlas Scientific Environmental Robotics  Referencia: ENV-40-pH	Operación:	Capacidad para permanecer completamente sumergida de manera indefinida, tanto en agua dulce como en agua salada, y profundidad máxima de trabajo de 60 metros.
	Medición	Continua
	Lectura	pH, rango de 0 a 14.
	Temperatura de operación	1 °C a 99 °C.
	Tipo de conector:	BNC, longitud del cable 1 metro.
	Tiempo de respuesta:	95% en 1 segundo
Circuito para acondicionamiento de señal para sonda de pH  Fabricante: Atlas Scientific Environmental Robotics	Compatibilidad:	Acondicionamiento de señal con sonda para medición de pH del fabricante Atlas Scientific Environmental Robotics.
	Voltaje de operación:	3.3 V – 5.0 V
	Variable de lectura:	pH, rango 0.001 a 14.000

INSTRUMENTO / DISPOSITIVO	CARACTERÍSTICAS REQUERIDAS	
Referencia: EZO-pH	Exactitud:	$\pm 0.002$
	Frecuencia de muestreo:	1 lectura por segundo.
	Tiempo de respuesta:	95% en 1 segundo
	Protocolos de datos:	UART e I <sup>2</sup> C.

Fuente: Atlas Scientific.

El pH, es la medición del potencial de hidrogeno que indica la actividad de iones de hidrogeno (H<sup>+</sup>) en una solución, este parámetro permite cuantificar el grado de acidez o alcalinidad en una solución química, para el caso del presente trabajo se corresponde con el nivel de acidez en el agua; el nivel de pH mide la concentración de átomos de hidrógeno en términos de gramos/litro:

Ecuación 1. Potencial de hidrogeno en una solución

$$\text{pH} = \log_{10}[1/\text{H}^+]$$

En la ecuación 1, H<sup>+</sup> es la concentración de iones de hidrógeno en la solución, los valores para la magnitud de pH varían desde 0 hasta 14, el valor de 0, representa un nivel extremo de acidez, el valor máximo de pH 14, indica el nivel extremo de alcalinidad. Para el estudio de caso hay que considerar como referencia que el nivel de pH en una muestra de agua pura tiene un valor de 7<sup>107</sup>.

Instrumentos para medición de conductividad eléctrica:

La conductividad eléctrica es el parámetro inverso a la resistencia eléctrica, la unidad de medición para esta variable es el Siemens (Ω), para entender la importancia de este parámetro como factor determinante de la calidad del agua, hay que partir del concepto de la resistividad eléctrica de un material, lo cual indica la propiedad del mismo para impedir el flujo de electrones, si los electrones tienen la capacidad de fluir fácilmente a través de un material, significa que dicho material tiene un bajo valor de resistividad<sup>108</sup>.

En los líquidos, y en particular en el agua, la conductividad eléctrica, es un factor que indica el nivel de sales disueltas, por lo tanto, se obtiene una relación proporcional en la capacidad del líquido para permitir la conducción de corriente eléctrica, esto se puede relacionar con la cantidad de sólidos disueltos en el agua, lo cual para el estudio de caso puede indicar el nivel de contaminación del agua; para el caso del prototipo, se seleccionó la sonda de prueba y el circuito de acondicionamiento de señal del fabricante de dispositivos de medición Atlas

<sup>107</sup> MORRIS, Alan S. Summary of other measurements. En: Measurement and instrumentation principles. 3 ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2001. p. 437-439.

<sup>108</sup> WEBSTER, John G. Electromagnetic variables measurement. En: The measurement, instrumentation and sensors Handbook. Boca Raton: CRC Press LLC and IEEE Prees. 1999. p. 1333-1334.

Scientific Environmental Robotics, las características de los dispositivos de medición de conductividad eléctrica, se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 17. Instrumentos para medición de conductividad eléctrica

INSTRUMENTO / DISPOSITIVO		CARACTERÍSTICAS REQUERIDAS
<b>Sonda de Conductividad K 10</b>  Fabricante: Atlas Scientific Environmental Robotics  Referencia: EC-K10	Operación:	Capacidad para permanecer completamente sumergida de manera indefinida, tanto en agua dulce como en agua salada, y profundidad máxima de trabajo de 60 metros.
	Medición	Continua
	Lectura	$\mu\text{S/cm}$ , rango: $0.07 \mu\text{S/cm} - 50,000 \mu\text{S/cm}$ .
	Temperatura de operación	$1^\circ\text{C}$ a $70^\circ\text{C}$ .
	Tipo de conector:	BNC, longitud del cable 1 metro.
	Tiempo de respuesta:	90% en 1 segundo.
<b>Circuito para acondicionamiento de señal para sonda de Conductividad</b>  Fabricante: Atlas Scientific Environmental Robotics  Referencia: EZO-EC	Compatibilidad:	Acondicionamiento de señal con sonda para medición de conductividad del fabricante Atlas Scientific Environmental Robotics K 0.1 – K 10.
	Voltaje de operación:	$3.3 \text{ V} - 5.0 \text{ V}$
	Variable de lectura:	Conductividad, rango $0.07 \mu\text{S/cm} - 500,000+ \mu\text{S/cm}$ .
	Exactitud:	$\pm 2\%$ .
	Frecuencia de muestreo:	1 lectura por segundo.
	Tiempo de respuesta:	90% en 1 segundo.
	Protocolos de datos:	UART e I <sup>2</sup> C.

Fuentes: Atlas Scientific.

#### Instrumentos para medición de oxígeno disuelto:

Este parámetro mide el volumen de oxígeno contenido en el agua, la cantidad de oxígeno que puede contener el agua depende de la temperatura del agua, la salinidad y la presión; la solubilidad del oxígeno en el agua aumenta con la disminución temperatura, por lo tanto, a menor temperatura del agua se espera una mayor cantidad de oxígeno, por otro lado, la solubilidad del oxígeno en el agua aumenta a medida que disminuye la salinidad del agua, debido a esto, existe una mayor concentración de oxígeno en el agua dulce, en comparación con la cantidad de oxígeno disuelto en el agua salada. Debido a factores como la altitud y la presión, la cantidad de oxígeno disuelto en el agua se ve afectada, a mayor altitud la cantidad de oxígeno disminuye, entre menor sea la presión disminuye la cantidad de oxígeno en el agua, debido a lo anterior, el oxígeno en el agua disminuye en la medida en que la fuente hídrica se encuentre a mayor altitud ya que disminuye la presión atmosférica<sup>109</sup>.

Existen diversos métodos de medición de oxígeno disuelto, uno de ellos es el método Winkler, de igual manera se utilizan dispositivos electrónicos (medidores DO), el método Winkler se realiza in vitro y requiere de toma de muestras en campo y protocolos de conservación de las mismas para su posterior análisis en

<sup>109</sup> ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Parameters of water quality. Interpretations and Standards. Wexford.: Environmental Protection Agency, 2001. ISBN 1-84096-015-3. p. 79-81.

laboratorio; a diferencia del método Winkler, la instrumentación electrónica permite realizar la medición del oxígeno disuelto in situ, para la medición de esta variable también se eligió la sonda, el circuito de acondicionamiento y los accesorios del fabricante: Atlas Scientific Environmental Robotics, adecuados para realizar la medición en campo de forma continua, las características de los dispositivos seleccionados se incluyen en la siguiente tabla.

Tabla 18. Instrumentos para medición de oxígeno disuelto

INSTRUMENTO / DISPOSITIVO		CARACTERÍSTICAS REQUERIDAS
Sonda de oxígeno disuelto  Fabricante: Atlas Scientific Environmental Robotics  Referencia: ENV-40-DO	Operación:	Capacidad para permanecer sumergida de manera indefinida, en agua dulce y agua salada, y profundidad máxima 60 mts.
	Medición	Continua
	Lectura	Oxígeno disuelto mg/L O <sub>2</sub> , rango 0 mg/L - 35 mg/L
	Temperatura de operación	1 °C a 50 °C.
	Tipo de conector:	BNC, longitud del cable 1 metro.
	Tiempo de respuesta:	~0.06 mg/L por segundo.
Circuito para acondicionamiento de señal para sonda de Conductividad  Fabricante: Atlas Scientific Environmental Robotics  Referencia: EZO-EC	Compatibilidad:	Acondicionamiento de señal con sonda para medición de oxígeno disuelto del fabricante Atlas Scientific.
	Voltaje operación:	3.3 V – 5.0 V
	Variable de lectura:	Oxígeno disuelto, rango 0.01 mg/L – 35.99 mg/L.
	Exactitud:	± 0.05 mg/L.
	Saturación	0.1 % – 100.0 %.
	Frecuencia de muestreo:	1 lectura por segundo.
	Tiempo de respuesta:	~0.06 mg/L por segundo.
	Protocolos datos:	UART e I <sup>2</sup> C.

Fuente: Atlas Scientific.

### 3.4.5 Circuitos y Plataformas para Adquisición de Datos.

Para diseñar la solución tecnológica fue necesario elegir una plataforma para la adquisición de datos provenientes de los circuitos de acondicionamiento de señal de cada una de las sondas de medición (sensores), antes de elegir la plataforma implementada en el prototipo, se realizó un análisis de las plataformas: Arduino®, BeagleBone, Linkit One, Raspberry PI 3 y Pycom®; la siguiente tabla muestra la relación de las características de las plataformas mencionadas, a partir de la comparación de estos parámetros se eligió la plataforma LoPy Pycom®, la que se instaló para tres módulo a disponer en los puntos especificados anteriormente: A, B y C del estudio de caso.

Tabla 19. Comparación de plataformas para el desarrollo de aplicaciones IoT

Plataforma de Hardware	Arduino® Uno	BeagleBone	MediaTek LinkIt™ UNO	Raspberry PI 3	LoPy Pycom®
Procesador	ATMega328P	Sitara AM3358BZCZ100	MT2502A ARM7EJ-S™ 260MHz	Quad Core 1.2GHz Broadcom BCM2837 64bit CPU	Espressif ESP32 chipset
Conectividad I/O	SPI, I2C, UART, GPIO	SPI, UART, I2C, McASP, GPIO	SPI, UART, I2C	SPI, DSI, UART, SDIO, CSI, GPIO	UART, SPI, I <sup>2</sup> C, I <sup>2</sup> S,
Entornos para desarrollo	Arduino® IDE	Debian, Android,	MediaTek MT2502A	NOOBS RASPBIAN	Atom, Visual Studio Code



Plataforma de Hardware	Arduino® Uno	BeagleBone	MediaTek LinkIt™ UNO	Raspberry PI 3	LoPy Pycom®
		Ubuntu, Cloud9 IDE, Node.js, BoneScript library			
Lenguaje de programación	Wiring	C, C++, Python, Perl, Ruby, Java, Node.js	OpenWrt, Node.js Python	Python, C, C++, Java, Scratch, Ruby	MicroPython
Servicios IoT en la nube	create.arduino.cc (editor web, administrador de dispositivos, almacenamiento en la nube).	Google Cloud Platform	Amazon Web Services	Supresión elevación	Pybytes (en etapa de desarrollo) Pymate
Protocolos de comunicación	IEEE 802.11 b/g/n, IEEE 802.15.4, 433RF, BLE 4.0, Ethernet, Serial	IEEE 802.11 b/g/n, 433RF, IEEE 802.15.4, BLE 4.0, Ethernet, Serial	802.11 b / g / n BR / EDR / BLE (Dual Mode)	IEEE 802.11 b/g/n, IEEE 802.15.4, 433RF, BLE 4.0, Ethernet, Serial	802.11b/g/n 16mbps, LoRaWAN™, Semtech LoRa transceiver SX1272, LoRaWAN™ stack, Class A and C devices
Requiere módulos adicionales para comunicación inalámbrica	Si, tarjeta de expansión Wi-Fi y antena.	Si, tarjeta de expansión Wi-Fi y antena.	Si, tarjeta de expansión Wi-Fi y antena.	Si, tarjeta de expansión Wi-Fi y antena.	Si, tarjeta de expansión Wi-Fi, LoRa y antena.
Voltaje de operación	5V	5V	5V	5V	3.3V - 5.5V

Fuente: Adaptado PULE, Mompoloki, YAHYA, Abid y CHUMA, Joseph<sup>110</sup>

La información relacionada en la tabla anterior permitió identificar que la plataforma LoPy Pycom® era la que más se ajustaba a las necesidades de la selección tecnológica propuesta, debido a que es compatible con tarjetas de expansión e incluye terminales de conexión para antenas compatibles con las tecnologías LoRa que trabajan en la frecuencia de 915MHz, que corresponde a la banda de comunicación libre según la normatividad colombiana vigente establecida por la Agencia Nacional del Espectro – ANE.

Adicional a las características presentadas en la Tabla 19, se resalta que los dispositivos LoPy y las tarjetas de expansión Pycom®, demandan un bajo consumo de potencia de 12mA en modo WiFi activo, 15mA en modo LoRa activo, y de 5µA y 10µA, respectivamente en modo de espera, y una fuente de poder de 3.3V, esto supone una ventaja frente a las demás plataformas en la medida que manejan bajos niveles de consumo de energía. El anterior fue uno de los factores determinantes para la selección de la plataforma del sistema de adquisición de datos, teniendo en cuenta que las estaciones de monitoreo se ubicaron en campo, donde no se tenía la posibilidad de acceder a la red de suministro eléctrico, se tuvo la necesidad de transmitir la información desde cada estación a través de una red inalámbrica; los dispositivos Pycom® son compatibles con las redes LoRaWAN™.

A continuación, se presenta la tabla comparativa entre las redes de área local, las redes de telefonía celular y las redes de área amplia de baja potencia, a partir de esta comparación también se encontró que las plataformas y dispositivos que más se ajustan a las necesidades del estudio de caso, son los dispositivos Pycom®.

<sup>110</sup> PULE, Mompoloki, YAHYA, Abid y CHUMA, Joseph. Wireless sensor networks: A survey on monitoring water quality. En: Journal of Applied Research and Technology, Volume 15, Issue 6, p. 562-570. ISSN 1665-6423. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jart.2017.07.004>Get rights and content.



Tabla 20. Comparación de tipos de redes inalámbricas para monitoreo

Parámetro de comparación	Redes de área local	Redes de área amplia de baja potencia	Redes de comunicación celular
	(Comunicación de corto alcance)	(LPWAN) Internet de las cosas	Máquina a máquina
Rendimiento	40%	45%	15%
Ventajas	Estándares establecidos, tecnología vigente	Bajo consumo de potencia	Amplia cobertura
Desventajas	Corta duración de batería, alto costo de implementación y dependencia de operadores	Tasa de transmisión de datos reducida, estándares emergentes.	Baja autonomía, alto costo de implementación.
Tecnologías soportadas	Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi	LoRa	GSM, 3G, H+, 4G

Fuente: Adaptado LoRa® Alliance<sup>111</sup>.

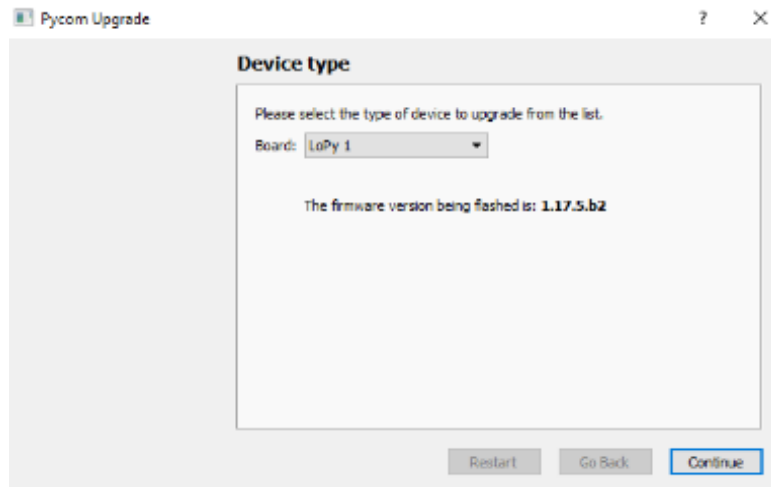
### 3.4.6 Configuración de Microcontrolador y Acondicionamiento de Señal.

A partir de las consideraciones expuestas en las tablas 19 y 20, se eligieron los dispositivos Pycom, para el desarrollo del montaje físico y lógico del sistema para realizar el monitoreo de los parámetros de calidad del agua, bajo el esquema del Internet de las Cosas, igualmente se eligió utilizar los instrumentos de medición de la serie Environmental Robotics del fabricante Atlas Scientific; otro factor que determinó la elección de estos dispositivos fue la posibilidad de configuración a través de los protocolos de comunicación UART e I<sup>2</sup>C, entre el microcontrolador (dispositivos LoPy) y los circuitos de acondicionamiento de señal de las sondas de medición (circuitos EZO™); en la solución propuesta, se eligió adoptar el protocolo I<sup>2</sup>C para comunicar los circuitos para acondicionamiento de señal y el microcontrolador.

El primer paso para la configuración de la comunicación mediante el protocolo I<sup>2</sup>C, entre los dispositivos de acondicionamiento de señal y el microcontrolador (LoPy), fue realizar el procedimiento de actualización de la versión del Firmware, con el fin de configurar el dispositivo en la región AU915, que corresponde a la banda libre de la región de Australia que maneja la frecuencia de transmisión de banda libre 915 MHz, la cual también es la banda libre para transmisión según lo estipulado por la normatividad del uso del espectro en Colombia.

<sup>111</sup> LoRa® ALLIANCE TECHNICAL MARKETING WORKGROUP. LoRaWAN™ What is it?: A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™. San Ramon, CA.: LoRa® Alliance, 2015. 20 p.

Figura 7. Ventana de actualización en la herramienta Pycom Upgrade

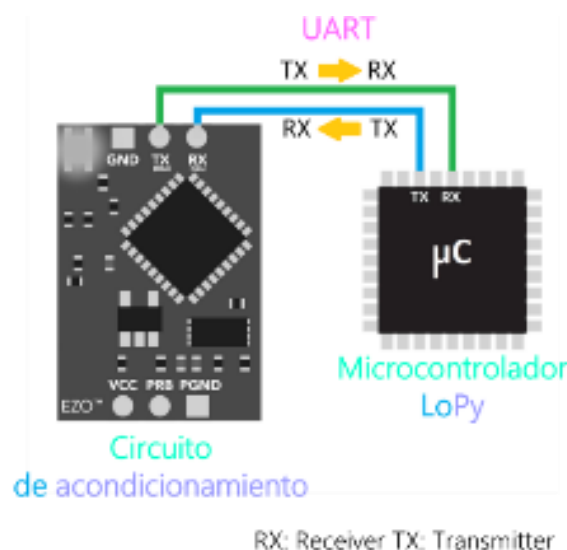


Fuente: Autor e investigadores.

La configuración de la comunicación I<sup>2</sup>C para el dispositivo microcontrolador LoPy implica la configuración del dispositivo mediante código de programación, lo cual se ilustra en la sección de este documento correspondiente al diseño lógico de la solución; por otra parte, fue necesario configurar cada uno de los circuitos de acondicionamiento EZO™ (pH, oxígeno disuelto y conductividad), en el modo I<sup>2</sup>C asignando las direcciones sugeridas por el fabricante para el manejo de dicho protocolo de comunicación.

Para la configuración de cada una de las direcciones I<sup>2</sup>C para los circuitos de acondicionamiento, fue necesario realizar la conexión UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter), para realizar la comunicación serial entre cada uno de los circuitos de acondicionamiento y el microcontrolador, para lo anterior se realizó la conexión que se ilustra en la siguiente imagen.

Figura 8. Comunicación serial para configuración I<sup>2</sup>C de circuitos EZO™



Fuente: Autor e investigadores.

Una vez implementado el circuito presentado en la figura 6, se requiere por línea de comandos realizar la lectura del valor de la variable y el tiempo de muestreo, para finalmente proceder a la asignación de la dirección para cada circuito de acondicionamiento.

### 3.4.7 Configuración del Circuito de Acondicionamiento pH EZO™.

La siguiente tabla relaciona los comandos empleados para conocer la configuración del circuito de acondicionamiento pH EZO™ y para asignarle la dirección I<sup>2</sup>C para la comunicación con el microcontrolador LoPy.

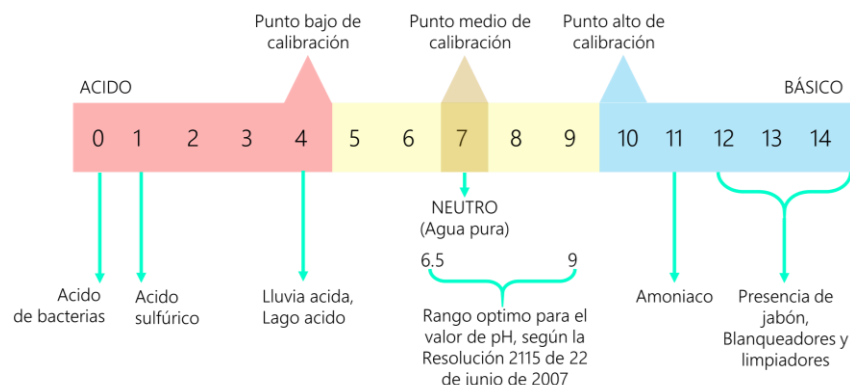
Tabla 21. Configuración del circuito pH EZO™

Parámetro	Comando	Resultado
Lectura de la variable	R <cr>	Lectura correcta
Tiempo de muestreo	C,? <cr>	1 segundo
Configuración I2C	I2C,99 <cr>	Dispositivo configurado en modo I2C - Dirección: 99
Verificación de lectura en I2C	R <cr>	Lectura única correcta
	Sleep <cr>	Dispositivo en modo reposo

Fuente: Autor e investigadores.

Una vez configurado el circuito pH EZO™ se realizó el procedimiento de calibración con las sustancias patrón de pH: 4.00, 7.00 y 10.00, para realizar una medición adecuada en el cauce de la quebrada “Las Cebollas”, el propósito de utilizar las tres sustancias patrón, es de cubrir los tres estados en los que se pudo ubicar el nivel de pH.

Figura 9. Rango de valores de pH y puntos de calibración



Fuente: Autor e investigadores

Adicional a la información incluida en la figura 7, es importante resaltar que el agua del afluente de la quebrada “Las Cebollas” es utilizado por la población del área circundante tanto para agricultura, irrigación y consumo para animales de granja; el valor óptimo de pH para su uso en agricultura se ubica en el rango de 6 a 8.5, para irrigación entre 4,5 a 9 y para el consumo humano entre 5 y 9<sup>112</sup>.

Para realizar la calibración de las sondas de medición de pH y los respectivos circuitos de acondicionamiento, se siguieron los pasos descritos en el protocolo de calibración para el circuito pH EZO™, con las sustancias patrón de 4, 7 y 10, según lo estipulado por el fabricante, el protocolo mencionado se relaciona en el Anexo 1.

#### 3.4.8 Configuración del Circuito de Acondicionamiento D.O. EZO™.

El D.O. EZO™ es el circuito requerido para el acondicionamiento de señal para la sonda de medición de oxígeno disuelto, la siguiente tabla muestra los comandos empleados para conocer la configuración del circuito de acondicionamiento DO EZO™ y para asignar la dirección I<sup>2</sup>C necesaria para establecer la comunicación con el microcontrolador LoPy.

Tabla 22. Configuración del circuito D.O. EZO™

Parámetro	Comando	Resultado
Lectura de la variable	R <cr>	Lectura correcta
Tiempo de muestreo	C,? <cr>	1 segundo
Configuración I <sup>2</sup> C	I2C,97 <cr>	Dispositivo configurado en modo I2C - Dirección: 97
Verificación de lectura en I <sup>2</sup> C	R <cr>	Lectura única correcta
	Sleep <cr>	Dispositivo en modo reposo

Fuente: Autor e investigadores.

Una vez configurado el circuito D.O. EZO™, en modo I<sup>2</sup>C, se realizó el procedimiento de calibración para realizar la medición del oxígeno disuelto en el

<sup>112</sup> POSTOLACHE, Octavian; SILVA GIRÃO, Pedro y DIAS PEREIRA, José Miguel. Water quality monitoring and associated distributed measurement systems: an overview. En: VOUDOURIS, Kostas y VOUTSA, Dimitra. Water quality monitoring and assessment. Rijeka.: InTech. 2012. p. 37-38.

agua, tomado en cuenta la presión atmosférica y la temperatura del medio al realizar la medición.

De igual forma, para el caso de las sondas y circuitos de acondicionamiento para la medición del oxígeno disuelto, se realizaron los pasos descritos en el protocolo de calibración para el circuito D.O. EZO™, con las sustancias patrón estipuladas por el fabricante, el protocolo de calibración de oxígeno disuelto se incluye en el Anexo 2.

#### 3.4.9 Configuración del Circuito de Acondicionamiento E.C. EZO™.

Al igual que las sondas de medición para pH y oxígeno disuelto, la sonda de medición de conductividad eléctrica requiere de un circuito de acondicionamiento de señal, para este circuito es el E.C. EZO™, en la siguiente tabla se muestran los comandos empleados para conocer la configuración del circuito de acondicionamiento y para la asignación de la dirección I<sup>2</sup>C necesaria para establecer la comunicación con el microcontrolador LoPy.

Tabla 23. Lectura de características y configuración del circuito D.O. EZO™

Parámetro	Comando	Resultado
Lectura de la variable	R <cr>	Lectura correcta
Tiempo de muestreo	C,? <cr>	1 segundo
Configuración I2C	I2C,100 <cr>	Dispositivo configurado en modo I2C - Dirección: 100
Verificación de lectura en I2C	R <cr>	Lectura única correcta
	Sleep <cr>	Dispositivo en modo reposo

Fuente: Autor e investigadores.

Luego de realizar la configuración del circuito E.C. EZO™, en modo I<sup>2</sup>C, se realizó la calibración requerida y según las instrucciones del fabricante, antes de realizar la medición de la conductividad eléctrica en el agua; para este procedimiento fue necesario tomar en cuenta la temperatura del ambiente para configurar el correspondiente valor de compensación, de igual manera en este mismo proceso se configuró el tipo de sonda utilizada para realizar la medición in situ de la variable.

Para el proceso de calibración de las sondas y circuitos de acondicionamiento para la medición de conductividad eléctrica, se siguió el protocolo de calibración del circuito E.C. EZO™, con las sustancias patrón estipuladas por el fabricante, según los procedimientos expuestos en el protocolo incluido como Anexo 3.

#### 3.4.10 Conexión I<sup>2</sup>C entre Circuitos de Acondicionamiento y Microcontrolador.

Para realizar la comunicación entre los tres circuitos de acondicionamiento EZO™ y el microcontrolador LoPy, se configuró la conexión en modo I<sup>2</sup>C, asignando a cada circuito EZO™ una dirección específica para establecer el protocolo de comunicación entre dichos dispositivos; la siguiente tabla muestra la relación de las direcciones asignadas a cada circuito de acondicionamiento, estas direcciones fueron asignadas siguiendo las instrucciones y recomendaciones del fabricante.

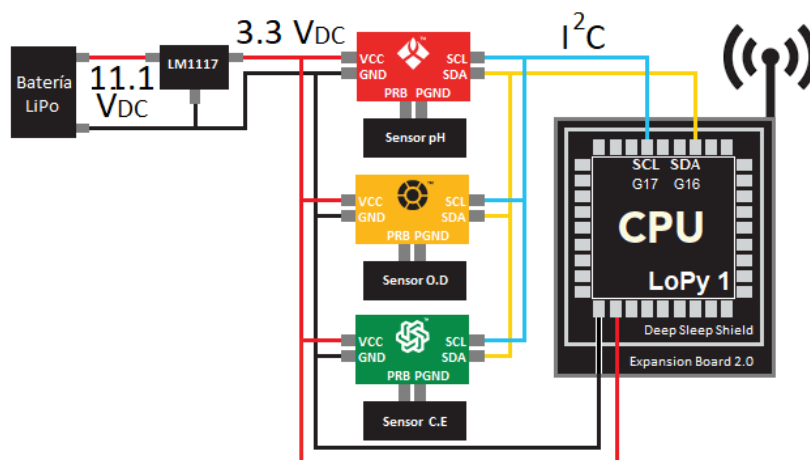
Tabla 24. Direcciones I<sup>2</sup>C para circuitos de acondicionamiento

Circuito de acondicionamiento EZO™	Dirección I <sup>2</sup> C
pH	99
Oxígeno disuelto	97
Conductividad eléctrica	100

Fuente: Autor e investigadores.

La Figura 10, muestra el diagrama de conexión entre las sondas de medición, los circuitos de acondicionamiento, el microcontrolador y la fuente de alimentación y, la etapa de regulación de voltaje.

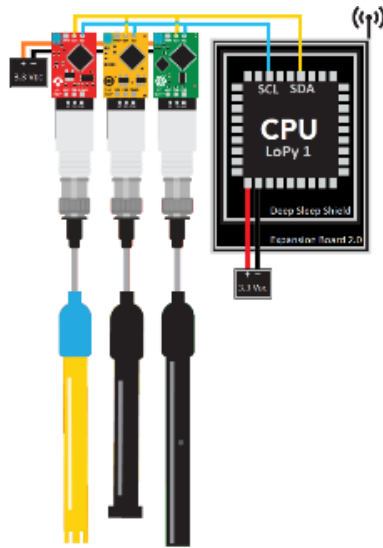
Figura 10. Conexión de circuitos EZO™ y microcontrolador LoPy



Fuente: Autor e investigadores.

La Figura 11, presenta el esquema general del circuito y la conexión física de los dispositivos que componen cada una de las estaciones de monitoreo para las variables: pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica.

Figura 11. Conexión de dispositivos para las estaciones de monitoreo



Fuente: Autor e investigadores.

Luego de realizar la conexión presentada entre las sondas de medición, los circuitos de acondicionamiento y el microcontrolador, se procedió a establecer la comunicación I<sup>2</sup>C con el microcontrolador LoPy, mediante las siguientes líneas de comandos, se verificó que la conexión y la comunicación I<sup>2</sup>C fuera la correcta, antes de este procedimiento se creó una librería para la lectura y el direccionamiento I<sup>2</sup>C de los circuitos EZO™ a través de microcontrolador LoPy.

Tabla 25. Verificación de lectura y direcciones I<sup>2</sup>C para circuitos EZO™

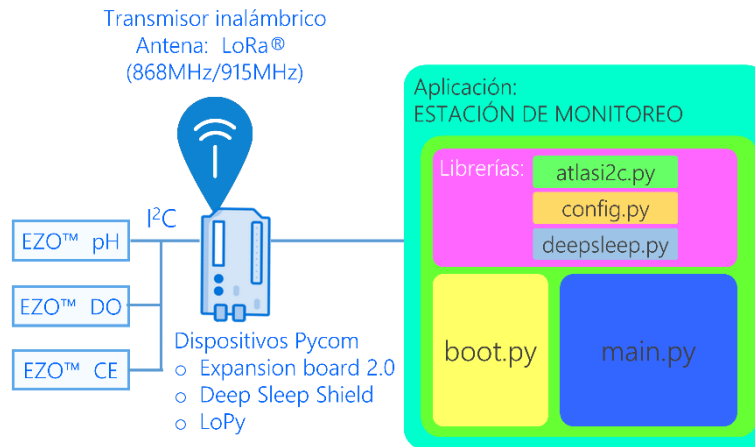
Comando	Lectura en monitor Serial LoPy
<pre>&gt;&gt;from machine import I2C &gt;&gt;i2c=I2C(0,mode=I2C.MASTER,baudrate=1000000) &gt;&gt;slave=i2c.scan() #&lt;- show slave list &gt;&gt;print(str(slave))</pre>	<pre>ph_sensor = atlati2c.ATLASI2C(i2c, addr=99) do_sensor = atlati2c.ATLASI2C(i2c, addr=97) ec_sensor = atlati2c.ATLASI2C(i2c, addr=100)</pre>

Fuente: Autor e investigadores.

### 3.4.11 Diseño Lógico del Sistema.

La solución propuesta implicó contar con tres estaciones de monitoreo, ubicadas en los puntos de monitoreo A, B y C respectivamente; la siguiente figura representa el esquema de cada uno de las estaciones de monitoreo, con el diagrama de bloques del código de programación, requerido para realizar la lectura de los valores de: pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica, desde cada uno de los circuitos de acondicionamiento, crear las variables análogas dentro del microcontrolador y finalmente para enviar los valores a través de la comunicación inalámbrica LoRa.

Figura 12. Estructura física y lógica de las estaciones de monitoreo



Fuente: Autor e investigadores.

---

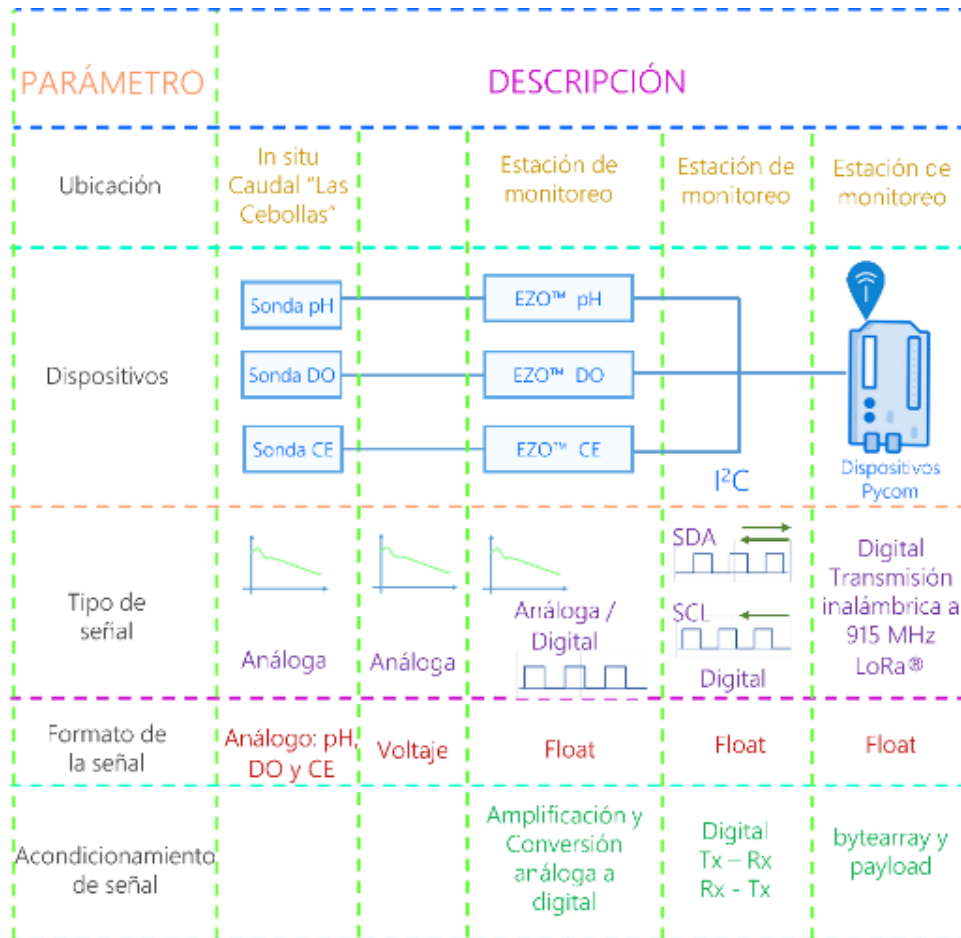
### Lectura de variables análogas y configuración para transmisión de datos a través de LoRa

---

Se configuró una comunicación alámbrica entre los circuitos EZO™ y el microcontrolador LoPy, tal como se presentó en las figuras anteriores: conexión de circuitos EZO™ y microcontrolador LoPy, conexión de dispositivos para las estaciones de monitoreo y, estructura física y lógica de las estaciones de monitoreo, con el fin de contar con un sistema capaz de medir los valores de: pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y el estado de la batería, in situ es decir en los puntos de monitoreo previamente señalados (A, B y C) a través de los dispositivos Pycom y Atlas Scientific. La figura 13, presenta el estado de la señal y el tipo de datos que se maneja en cada etapa del sistema.



Figura 13. Tipo de señal según las etapas del sistema de medición



Fuente: Autor e investigadores

A continuación, se especifica cada una de las funciones de los bloques que conforman la aplicación para las estaciones de monitoreo.

Tabla 26. Descripción de la aplicación: Estaciones de monitoreo

Archivo	Tipo	Función
atlas2c.py	Librería	<ul style="list-style-type: none"> <li>Definida como una clase, esta librería tiene el propósito de configurar el tipo de direccionamiento requerido para establecer la comunicación mediante I<sup>2</sup>C, entre el microcontrolador LoPy y los circuitos de acondicionamiento EZO™, establece el valor del periodo para los ciclos de reloj, las direcciones iniciales, así como el tiempo y valor inicial para realizar la comunicación.</li> <li>Define los parámetros para la escritura de las direcciones de los circuitos EZO™ y para la lectura de los valores numéricos (float), que reportan cada uno de ellos.</li> </ul>
config.py	Librería	La programación del microcontrolador LoPy, se realiza desde un ordenador a través de una conexión inalámbrica 802.11n (Wi-Fi), para este fin se requiere de una librería que permita al microcontrolador, establecer un enlace con el ordenador a través de una conexión inalámbrica, especificando el nombre de la red y la contraseña de acceso a la misma, de esta manera una vez establecida la conexión a la red, se podrá programar el dispositivo LoPy desde el ordenador, utilizando la herramienta Visual Studio Code.
deepsleep.py	Librería	El microcontrolador LoPy del fabricante Pycom, requiere de la tarjeta de expansión (Expansion Board 2.0) con el fin de poder manejar la conexión del transmisor inalámbrico, que en este caso es la antena LoRa®, bajo la especificación de transmisión en frecuencia de 868MHz a 915MHz.

Archivo	Tipo	Función
		<ul style="list-style-type: none"> <li>o De igual forma para optimizar el consumo de energía se decidió utilizar la tarjeta de bajo consumo (Deep Sleep Shield), esta última, establece una configuración diferente entre las terminales del microcontrolador LoPy y la tarjeta de expansión, por lo tanto requiere de un código de programación adicional que establezca los parámetros de conexión física y su equivalencia en el código de programación y la definición de los diferentes estados según los parámetros de bajo consumo requeridos por la solución tecnológica.</li> <li>o También configura los bits: sets, clear, y toggle, y finalmente se configura las instrucciones de auto apagado y auto habilitación la tarjeta de bajo consumo.</li> </ul>
boot.py	Archivo de configuración	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Este archivo se ejecuta una única vez se conecta el conjunto de los tres dispositivos a la fuente de poder de 3.3 volt, además de realizar el llamado de las librerías: config, network y WLAN.</li> <li>o Este archivo de configuración también se encarga de configurar os parámetros de red: dirección IP, máscara de subred y puerta de enlace predeterminada.</li> </ul>
main.py	Archivo del código de programación	<ul style="list-style-type: none"> <li>o En el código de programación se hace el llamado a las librerías atlati2c, I<sup>2</sup>C, ADC, deepsleep, y se establece la frecuencia de transmisión a 917600000 Hz.</li> <li>o Se establece la comunicación I<sup>2</sup>C (LoPy y circuitos EZO™), a 100000 baudios, y mediante el direccionamiento específico para cada uno de los circuitos EZO™.</li> <li>o Establece los parámetros y configura la transmisión de datos a través de LoRaWAN.</li> <li>o Inicializa el conversor análogo a digital y monitorea el estado de la batería a través de las terminales de polarización.</li> <li>o Se crean cuatro variables análogas: estado de la batería, pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica.</li> <li>o Se leen los valores de los estados de las cuatro variables análogas: estado de la batería, pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica.</li> <li>o Se configura el envío de los valores de las cuatro variables por medio de las funciones bytearray y payload.</li> <li>o Se envía los valores de las cuatro variables análogas: estado de la batería, pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica, para que sean direccionados a la plataforma TTN y posteriormente desde está a la plataforma myDevices de Cayennne.</li> <li>o Se inhabilita el dispositivo configurándolo en modo consumo de baja energía durante un minuto, luego de transcurrido este tiempo, se habilita el dispositivo de nuevo y se procede a realizar de nuevo el procedimiento de lectura.</li> </ul>

Fuente: Autor e investigadores.

## Diseño de red para programación de microcontroladores y configuración del Gateway

Como se mencionó en numerales anteriores, la programación de los microcontroladores LoPy de Pycom, se realiza a través de una conexión inalámbrica desde un computador, vía Wi-Fi y desde el entorno para desarrollo de Visual Studio Code; para esto fue necesario asignar a cada microcontrolador una dirección IP, a partir de la configuración de red del Gateway al momento de realizar su vinculación a TTN.

Las Tablas 27 a la 30 presentan la información relacionada con las direcciones IPv4, para los dispositivos que conforman la solución tecnológica propuesta.

Tabla 27. Parámetros de configuración para Gateway MultiTech

Parámetro de configuración	Dirección IPv4
Dirección del Gateway	192.168.1.1
Máscara de subred	255.255.255.0
DNS	8.8.8.8

Fuente: Autor e investigadores.

Para cada dispositivo LoPy, que cumplen la función de la unidad central de proceso dentro de las estaciones de monitoreo, también fue necesario asignar una dirección IPv4 con el fin de realizar la programación de los mismos, de la manera ya mencionada; a continuación, se incluyen los parámetros de configuración de cada uno de estos dispositivos.

Para el dispositivo microcontrolador Pycom LoPy 1, correspondiente a la estación de monitoreo A, se tuvo en cuenta la siguiente configuración:

Tabla 28. Parámetros de configuración de red para el dispositivo LoPy 1

Comando para configuración en archivo boor.py: wlan.ifconfig(config=('192.168.1.201', '255.255.255.0', '192.168.1.1', '8.8.8.8'))	
Parámetro de configuración	Dirección IPv4
Dirección del Gateway	192.168.1.201
Máscara de subred	255.255.255.0
Puerta de enlace predeterminada	192.168.1.1
DNS	8.8.8.8

Fuente: Autor e investigadores.

De igual forma para el dispositivo microcontrolador Pycom LoPy 2, correspondiente a la estación de monitoreo B, se tuvo en cuenta la siguiente configuración:

Tabla 29. Parámetros de configuración de red para el dispositivo LoPy 2

Comando para configuración en archivo boor.py: wlan.ifconfig(config=('192.168.1.202', '255.255.255.0', '192.168.1.1', '8.8.8.8'))	
Parámetro de configuración	Dirección IPv4
Dirección del Gateway	192.168.1.202
Máscara de subred	255.255.255.0
Puerta de enlace predeterminada	192.168.1.1
DNS	8.8.8.8

Fuente: Autor e investigadores.

Finalmente, para el dispositivo microcontrolador Pycom LoPy 3, correspondiente a la estación de monitoreo C, se tuvo en cuenta la siguiente configuración:

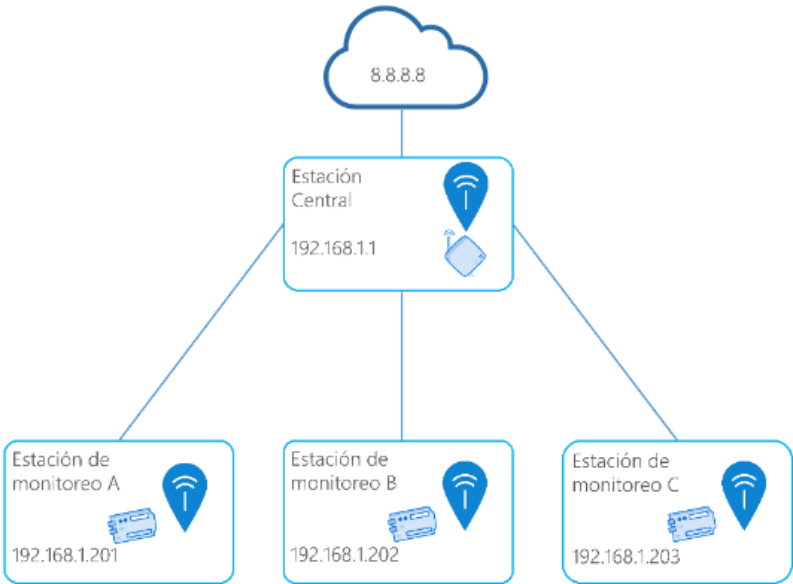
Tabla 30. Parámetros de configuración de red para el dispositivo LoPy 3

Comando para configuración en archivo boor.py: wlan.ifconfig(config=('192.168.1.203', '255.255.255.0', '192.168.1.1', '8.8.8.8'))	
Parámetro de configuración	Dirección IPv4
Dirección del Gateway	192.168.1.203
Máscara de subred	255.255.255.0
Puerta de enlace predeterminada	192.168.1.1
DNS	8.8.8.8

Fuente: Autor e investigadores.

La Figura 14, resume el diseño de la red para la programación de los microcontroladores Pycom y el enlace con el Gateway MultiTech.

Figura 14. Esquema de la red y direcciones IPv4



Fuente: Autor e investigadores.

Direcciones LoPy MAC de microcontroladores LoPy de Pycom

A continuación se presentan los parámetros correspondientes a la disposición de cada una de las estaciones de monitoreo, como se puede observar la unidad central de proceso del sistema es el microcontrolador LoPy del fabricante Pycom, este dispositivo aparte de ser un circuito integrado microcontrolador, posee módulos de comunicación inalámbrica, Wi-Fi, Bluetooth y LoRa®, por MAC, que para el caso de este tipo de dispositivos recibe el nombre de EUI, que es la dirección MAC para el módulo de comunicación LoRa® para los dispositivos LoPy, lo cual se define como LoPy MAC.

Por línea de comandos desde el monitor serial del dispositivo, se ejecutan las siguientes líneas de comando para conocer la dirección LoPy MAC de cada uno de los microcontroladores Pycom, que para el caso de la solución tecnológica propuesta son tres, uno por cada estación de monitoreo.

Tabla 31. Comando para obtener la dirección LoPy MAC

Comando	LoPy MAC
>> import binascii >> import network >> binascii.hexlify(network.LoRa().mac())	LoPy 1: estación de monitoreo A >>b'70b3d5499ab40161'  LoPy 2: estación de monitoreo B >>b'70B3D5499FAC350F'  LoPy 3: estación de monitoreo C >>b'70B3D5499DF056AF'

Fuente: Autor e investigadores.

Como se evidencia en la tabla anterior cada microcontrolador LoPy de Pycom, está identificado por una dirección EUI (LoPy MAC) diferente, lo cual permite un único registro por dispositivo dentro de una aplicación, que en este caso se creó en la plataforma TTN (The Things Network).

#### Creación de la aplicación y registro de dispositivos en la plataforma TTN

Antes de crear la aplicación y de realizar el registro de los dispositivos en la plataforma TTN, se creó una cuenta y un perfil de usuario para realizar el registro de la aplicación y de los dispositivos, una vez se crea el perfil que alojará la aplicación y los dispositivos IoT de Pycom (CPU microcontroladores) y MultiTech (Gateway), se procedió a crea la aplicación denominada: “app-calidad-agua”. La Tabla 32, muestra la relación de la información asociada a la aplicación alojada en la plataforma TTN.

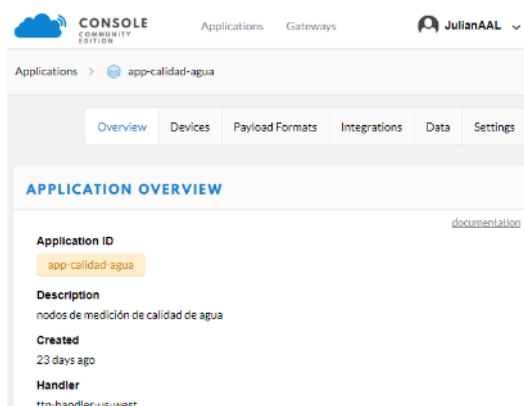
Tabla 32. Parámetros de la aplicación “app-calidad-agua” en TTN

Parámetro	Identificación en TTN
ID de la aplicación	app-calidad-agua
Descripción	nodos de medición de calidad de agua
Modo de alojamiento	ttn-handler-us-west (se eligió esta opción dada las características de los dispositivos, el área y las frecuencias de transmisión)
Dirección de la aplicación (Application EUI)	70B3D57ED000ECCE
Propietario de la Aplicación	JulianAAL

Fuente: Autor e investigadores.

La siguiente figura, presenta la vista de la información general presentada en la plataforma TTN, luego de crear la aplicación: “app-calidad-agua”

Figura 15. Vista general de la aplicación: app-calidad-agua en TTN

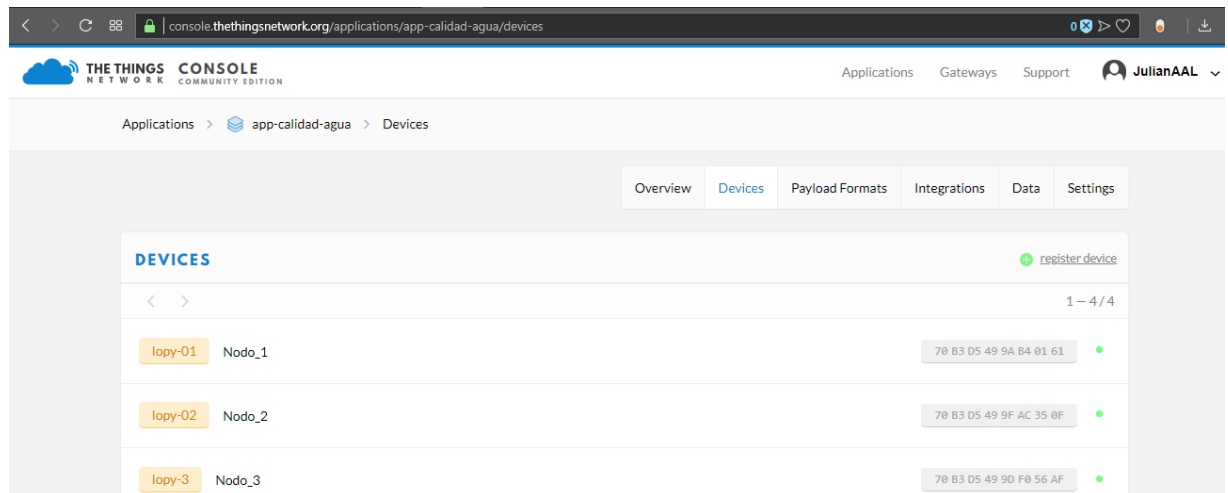


Fuente: Autor e investigadores.

Luego de crear la aplicación para el monitoreo de las variables de pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica, se incluyó el monitoreo del estado de la batería, datos que se adquieren a través de los dispositivos Pycom (microcontroladores

LoPy); por tal motivo fue necesario registrar cada uno de los tres dispositivos (cada uno se constituye en la CPU de cada una de las tres estaciones de monitoreo) dentro de la aplicación “app-calidad-agua”.

Figura 16. Relación de dispositivos LoPy en la aplicación: app-calidad-agua



Fuente: Autor e investigadores.

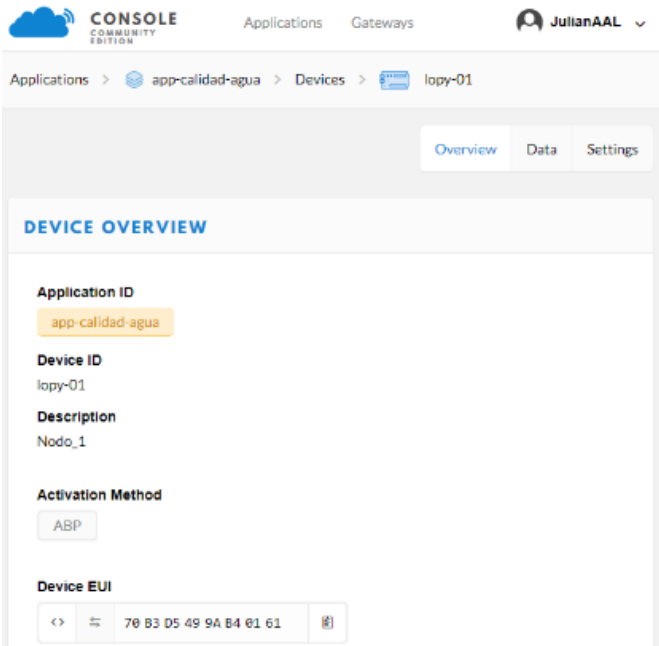
Los tres dispositivos se asociaron a la misma aplicación “app-calidad-agua”, asignando a cada uno una identificación y una descripción, tal como se presenta en la Tabla 33 y en la Figura 17.

Tabla 33. Registro de dispositivos LoPy en plataforma TTN

Dispositivo	LoPy MAC	ID del dispositivo	Descripción	Estación de monitoreo
LoPy 1	70b3d5499ab40161	lopy-01	Nodo_1	A
LoPy 2	70B3D5499FAC350F	lopy-02	Nodo_2	B
LoPy 3	70B3D5499DF056AF	lopy-3	Nodo_3	C

Fuente: Autor e investigadores.

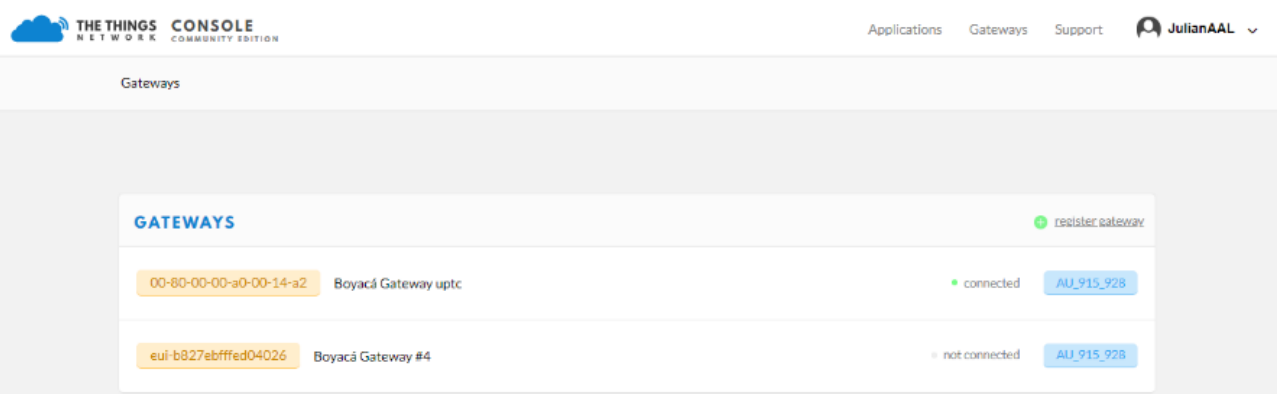
Figura 17. Evidencia de registro de dispositivo LoPy en plataforma TTN



Fuente: Autor e investigadores.

Luego del registro de los dispositivos microcontroladores LoPy de Pycom, se procedió a registrar y actualizar el software y controladores del Gateway MultiTech, a diferencia del registro de los microcontroladores que adquieren la señal a partir de los circuitos de acondicionamiento EZO™, que son registrados dentro de la aplicación “app-calidad-agua”, el Gateway se registra fuera de la aplicación, pero dentro de la plataforma TTN, la Figura 18, muestra el estado “conectado” del Gateway MultiTech, al cual se le asignó el nombre de: “Boyacá Gateway uptc”.

Figura 18. Registro de Gateway MultiTech en plataforma TTN



Fuente: Autor e investigadores.

El Gateway también tiene una dirección MAC única, que lo identifica al igual que los demás parámetros requeridos para su configuración. A continuación, se incluye la relación de los parámetros de registro del Gateway en la plataforma TTN.

Tabla 34. Registro del Gateway MultiTech en plataforma TTN

Gateway: MultiTech modelo MTCDT	
Gateway ID (dirección MAC)	00-80-00-00-a0-00-14-a2
Descripción en plataforma TTN	Boyacá Gateway uptc
Asociado al usuario	JulianAAL
Estado	Conectado
Plan de frecuencia	Australia 915MHz, debido a que maneja la misma especificación que la normatividad colombiana vigente para el uso de la banda de frecuencia libre.
Tipo de router para la aplicación	ttn-router-us-west
Antena	868-915 MHz LoRa
Ubicación	En campo a una altitud de 2693 metros sobre el nivel del mar

Fuente: Autor e investigadores.

Toda la información llega a la plataforma de TTN a través del Gateway MultiTech, llamado “Boyacá Gateway uptc”, bajo el esquema de transmisión LoRaWAN®, mediante el código de programación “main.py” realizado en el lenguaje MicroPython; se generó el arreglo de bytes (bytearray) en el formato de payload; para luego integrar la aplicación creada en la plataforma TTN, con las herramientas de la plataforma Cayenne myDevices (aspecto que se aclara en el capítulo 4). Las siguientes imágenes presentan la función de recibo de datos provenientes del Gateway MultiTech, que a su vez toma los datos de las variables: pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, desde cada una de las tres plataformas, cuyas unidades centrales del proceso son los dispositivos microcontroladores LoPy.

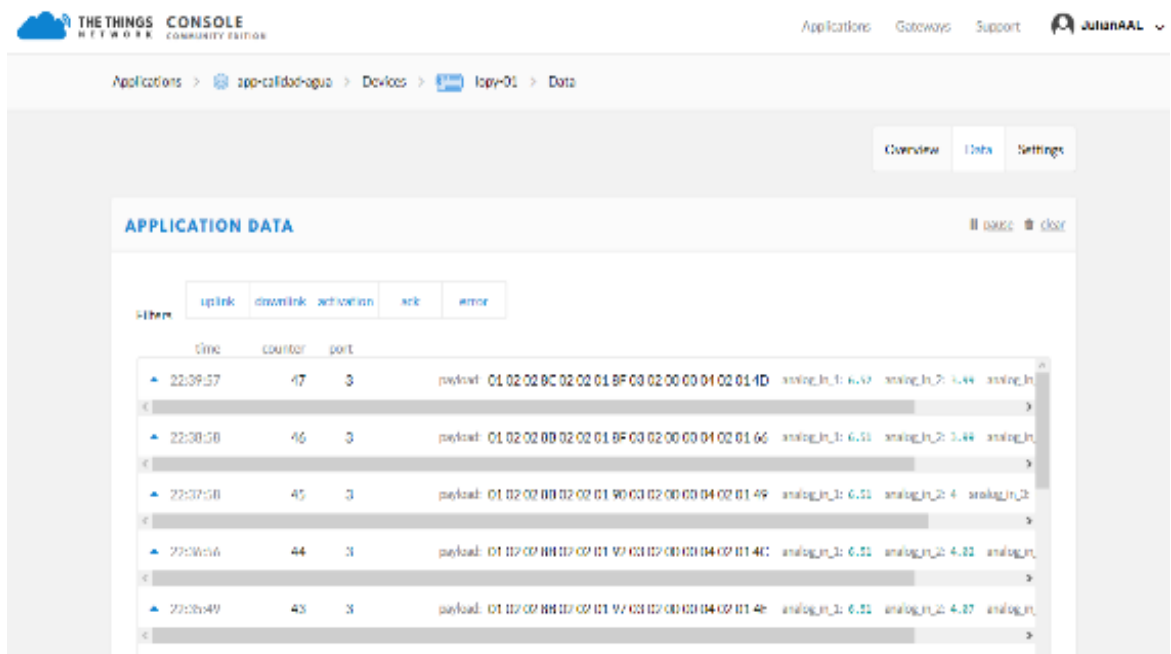
A continuación, se presenta la adquisición de las variables de pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y estado de la batería, desde la estación de monitoreo A, relacionando la hora exacta en la que se recibió el dato, el estado del contador de los mismos, el puerto a través del cual se recibió la información y el dato correspondiente a cada variable, cada uno de ellos representado por cuatro datos análogos en un arreglo de bytes en formato payload.

- analog\_in\_1: pH
- analog\_in\_2: oxígeno disuelto
- analog\_in\_3: conductividad eléctrica
- analog\_in\_4: estado de la batería (nivel de carga)

Lo anterior, se evidencia también para los casos de las estaciones de monitoreo denominadas como B y C.



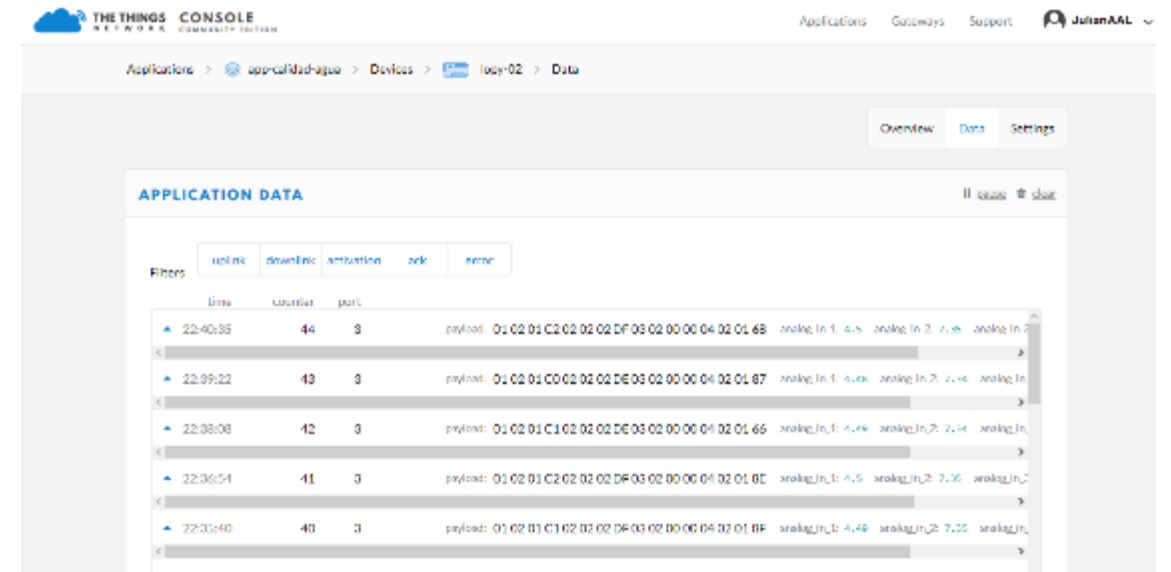
Figura 19. Adquisición de variables en la estación A en plataforma TTN



Fuente: Autor e investigadores.

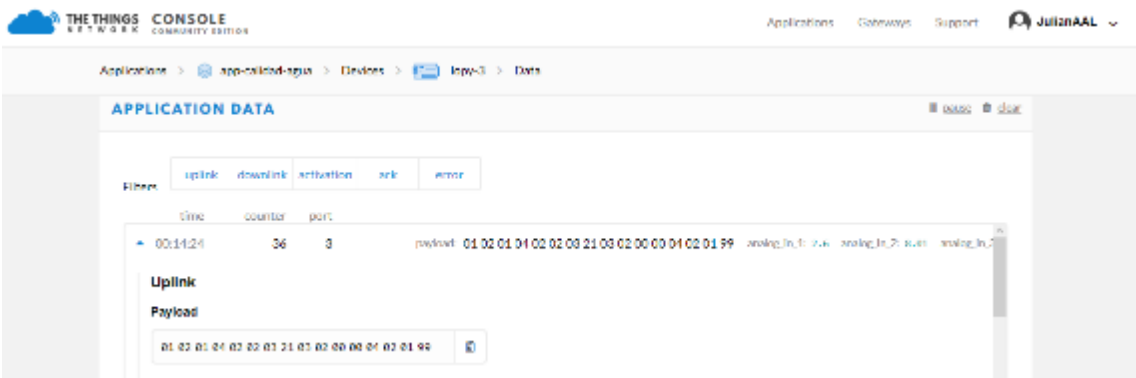
Se aclara que en el caso de la Figura 19 aparece relacionado el dispositivo denominado: lopy-01 que corresponde a la estación de monitoreo A. Para las estaciones de monitoreo B (lopy-02) y C (lopy-3) se cuenta con un esquema similar.

Figura 20. Adquisición de variables en la estación B en plataforma TTN



Fuente: Autor e investigadores.

Finalmente se incluye la Figura 21, como evidencia de la lectura de datos a través del Gateway MultiTech, de los datos provenientes de la estación de monitoreo C. Figura 21. Adquisición de variables en la estación C en plataforma TTN



Fuente: Autor e investigadores.

La comunicación entre los dispositivos LoPy y el Gateway MultiTech, se realiza bajo el esquema de LoRa®, lo cual se configura tanto desde los microcontroladores LoPy como desde la configuración del Gateway, mediante la siguiente línea de comandos.

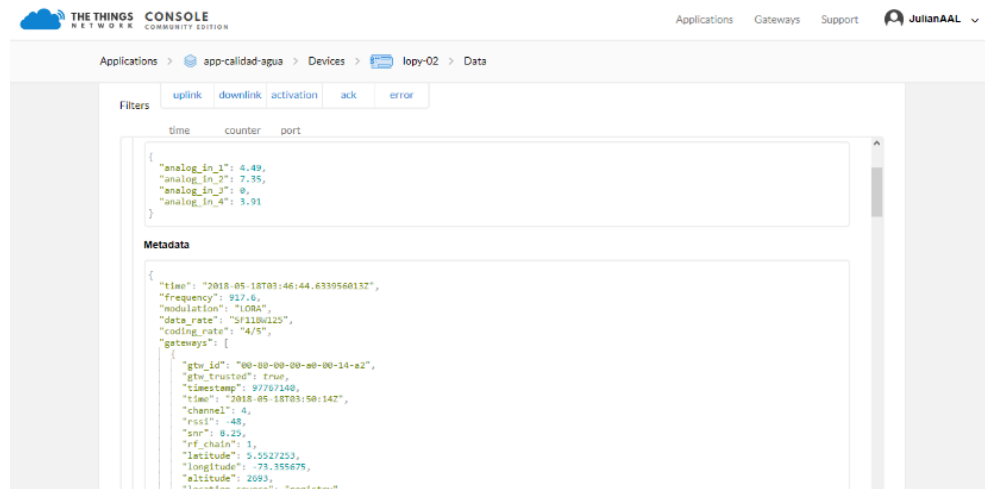
Tabla 35. Configuración LoRa® para el Gateway MultiTech en TTN

Comandos para configuración de comunicación LoRa® Gateway MultiTech
<pre>{   "gw_id": "00-80-00-00-a0-00-14-a2",   "payload": "QMISAIYAGgADb8GNINp6cIVFIquEIKbRMUXeVOw=",   "f_cnt": 26,   "lora": {     "spreading_factor": 11,     "bandwidth": 125,     "air_time": 905216000   },   "coding_rate": "4/5",   "timestamp": "2018-05-18T05:02:11.147Z",   "rssi": -87,   "snr": 8,   "dev_addr": "260212C2",   "frequency": 917600000 }</pre>

Fuente: Autor e investigadores

La Figura 22, muestra el menú de configuración del Gateway en la plataforma TTN, en lo que corresponde al esquema de comunicación LoRa® y a la frecuencia de trasmisión en la banda libre, según la normatividad colombiana vigente para el uso del espectro.

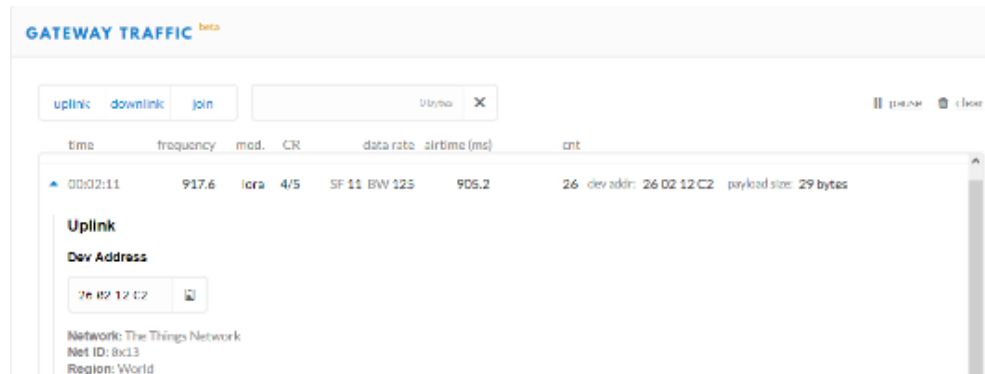
Figura 22. Configuración LoRa® para Gateway MultiTech en TTN



Fuente: Autor e investigadores.

En la ventana de supervisión de la plataforma TTN, respecto al tráfico a través de Gateway, se verifica la frecuencia utilizada para la transmisión 917.6MHz y el tipo de modulación, que en este caso corresponde a LoRa®.

Figura 23. Tráfico de datos a través del Gateway MultiTech en TTN

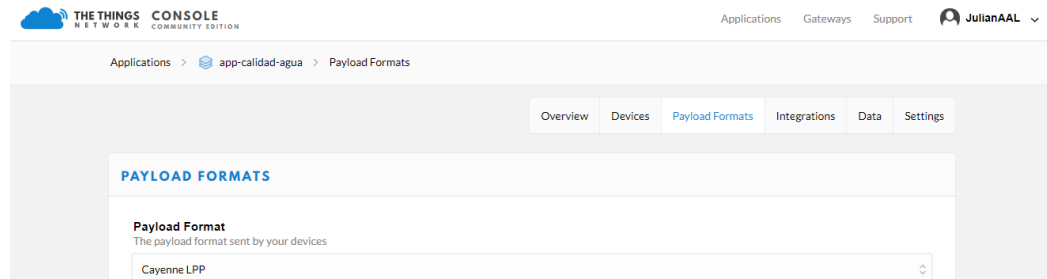


Fuente: Autor e investigadores.

## Integración de la aplicación TTN con la plataforma Cayenne myDevices

Hasta esta etapa la plataforma TTN, ha sido utilizada para la gestión del tráfico desde cada una de las tres estaciones de monitoreo, que a través del Gateway llegan a la plataforma TTN; la siguiente etapa del desarrollo tecnológico, fue realizar la visualización de la información proveniente de cada estación (pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y estado de carga de la batería), para desplegar esta funcionalidad en el sistema se utilizaron las herramientas de integración de la plataforma TTN con Cayenne myDevices, bajo el formato: Cayenne LPP (Payload Format).

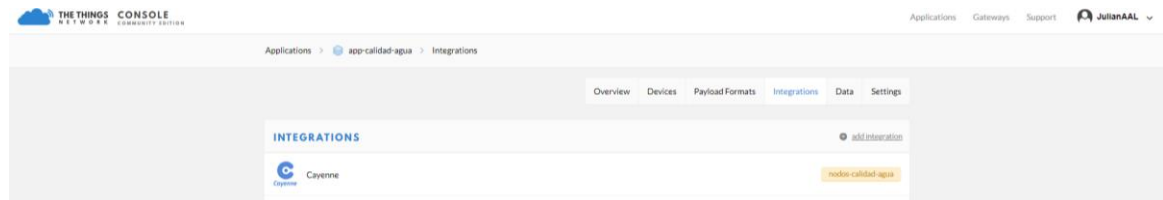
Figura 24. Integración de la aplicación TTN con Cayenne



Fuente: Autor e investigadores.

Una vez se configura la integración desde la plataforma Cayenne, en el formato Cayenne LPP, presentada en la Figura 20, se procedió a incluir la aplicación “app-calidad-agua”; bajo este esquema se registró la integración desde el menú de integraciones de la plataforma TTN con Cayenne, para el caso específico de la aplicación mencionada.

Figura 25. Integración app-calidad-agua TTN con Cayenne



Fuente: Autor e investigadores.

Luego de realizar la integración de la aplicación “app-calidad-agua TTN con Cayenne”, se registraron cada uno de los dispositivos en la plataforma de myDevices de Cayenne mediante las direcciones MAC de cada LoPy (Devices EUI); al momento de registrar cada microcontrolador LoPy, se le asignó un nombre para su identificación y se asoció con la aplicación creada en TTN denominada “app-calidad-agua”.

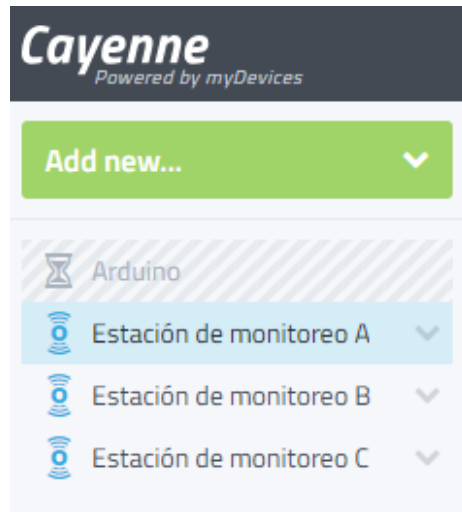
Tabla 36. Registro de dispositivos LoPy en Cayenne myDevices

Dispositivo	LoPy MAC	ID del dispositivo para Cayenne myDevices
LoPy 1	70b3d5499ab40161	Estación de monitoreo A
LoPy 2	70B3D5499FAC350F	Estación de monitoreo B
LoPy 3	70B3D5499DF056AF	Estación de monitoreo C

Fuente: Autor e investigadores.

Luego de configurar los parámetros presentados en la tabla anterior en la plataforma, se estableció el menú de dispositivos que representan cada una de las estaciones de monitoreo, en el menú de herramientas de Cayenne myDevices.

Figura 26. Estaciones de monitoreo A, B y C en Cayenne myDevices



Fuente: Autor e investigadores.

Finalmente, se inicializó cada uno de los dispositivos dando inicio a la captura de información de las variables de: pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y estado de carga de la batería, lo anterior con el fin de cargar estos datos a través del formato “Payload”, una vez se recibieron los cuatro datos análogos provenientes desde la plataforma TTN, se realizaron los ajustes pertinentes para su visualización en la interfaz de usuario.

Tabla 37. Asignación de variables análogas en Cayenne

Variable en TTN	Nombre de la variable en Cayenne myDevices
analog_in_1	pH
analog_in_2	Oxígeno disuelto
analog_in_3	Conductividad eléctrica
analog_in_4	Estado de la batería

Fuente: Autor e investigadores.

Las Figuras 27 a 29 presentan la captura de los resultados presentados en la aplicación Cayenne myDevices, realizando pruebas en ambiente controlado en laboratorio, adicional a la información de las cuatro variables análogas (pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y estado de carga de la batería), la aplicación muestra la información de los parámetros RSSI y SNR de la transmisión para cada estación.

Figura 27. Estación de monitoreo A en Cayenne myDevices



Fuente: Autor e investigadores.

Figura 28. Estación de monitoreo B en Cayenne myDevices



Fuente: Autor e investigadores.

Figura 29. Estación de monitoreo C en Cayenne myDevices



Fuente: Autor e investigadores.

Dentro de las funciones que brinda la aplicación generada mediante la integración de las plataformas TTN y Cayenne myDevices, se tiene la posibilidad de observar los registros de los valores de cada variable de cada una de las estaciones; las siguientes imágenes evidencian el registro de los valores de pH y oxígeno disuelto.

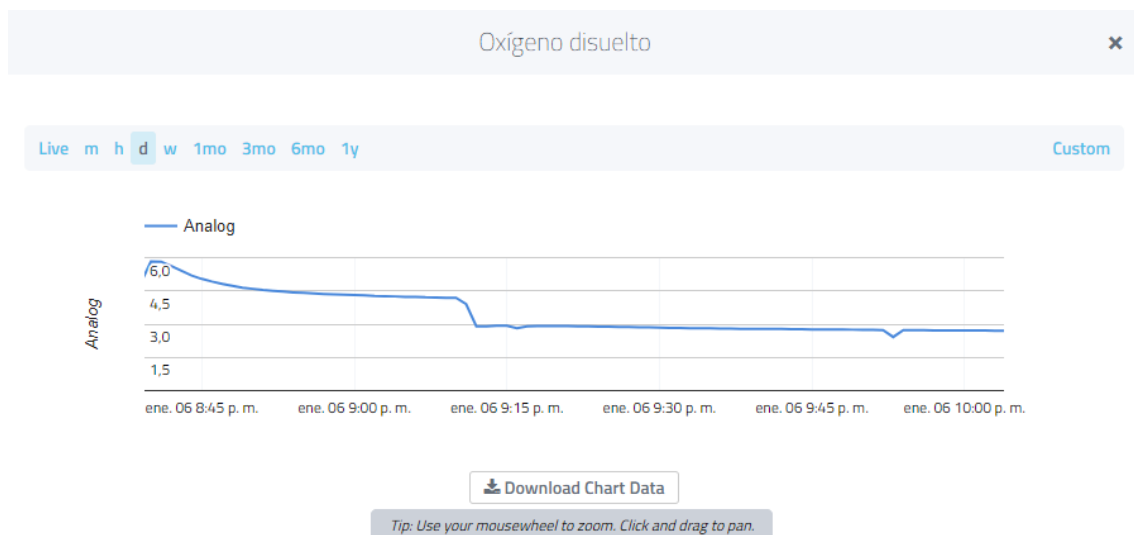
Es importante, resaltar que se puede obtener registros variando los periodos (hora, días, semanas, meses y años).

Figura 30. Registro de Monitoreo de pH en Cayenne myDevices



Fuente: Autor e investigadores.

Figura 31. Registro de monitoreo de oxígeno disuelto en Cayenne myDevices

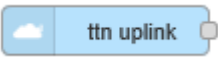






Fuente: Autor e investigadores.

## Programación en Node-RED Dashboard

Para lograr enlazar los datos recibidos a través de la plataforma de TTN se utilizaron las herramientas de programación del tablero de trabajo de Node-RED (Node-RED Dashboard); a través de esta herramienta de programación se configuraron las funciones requeridas para enlazar la aplicación generada en TTN, denominada app-calidad-agua, con la función que permite el despliegue de los datos de pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto; a continuación se describe la función de cada uno de los bloques de programación (nodos) utilizados para la programación de funciones para generar la solución requerida.

Tabla 38. Bloques de programación Node-RED

Función (nodo)	Representación	Tipo de función	Propósito dentro de la programación
ttn uplink		Entrada	<p>Recibe datos provenientes de la plataforma TTN, en este caso recibe el payload en formato Cayenne LPP (Payload Format), configurado según lo especificado en la Tabla 46, correspondiente a la asignación de variables análogas en Cayenne, segunla estructura de datos análogos, dispuesto de la siguiente forma:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-analog_in_1: pH</li> <li>-analog_in_2: oxígeno disuelto</li> <li>-analog_in_3: conductividad eléctrica</li> </ul>
Function node		Entrada y salida	<p>Aloja el código de programación requerido para la lectura del payload en formato Cayenne LPP (Payload Format) y la extracción de un dato específico, dando origen a un filtro que permite la lectura individual de las variables:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-analog_in_1: pH</li> <li>-analog_in_2: oxígeno disuelto</li> <li>-analog_in_3: conductividad eléctrica</li> </ul>
Gauge		Salida (indicador)	<p>Captura el dato proveniente de un nodo de función (function node), e indica de forma gráfica dicho valor en el formato de un instrumento de medición con función de indicador.</p> <p>Este nodo o bloque de programación, se utilizó para desplegar de forma gráfica los datos de cada una de las variables análogas que conforman el payload, debido a que tiene 4 modos: estándar (simple), dona (completa 360 °), brújula y onda; además de lo anterior permite especificar la gama de colores de los indicadores estándar y de rosquilla según los rangos obtenidos de cada variable análoga.</p>
Chart		Salida (indicador)	<p>Captura el dato proveniente de un nodo de función (function node), y traza una gráfica de dispersión XY, en la que se representa el comportamiento de una determinada variable de tipo análogo en función del tiempo.</p> <p>Al igual que el bloque de programación (gauge), se utilizó el bloque chart, para presentar una gráfica de los valores de cada una de las variables análogas respecto al tiempo, debido a que permite aceptar datos en dos modos de línea, barra y gráfico circular, incluye las etiquetas del eje X y el eje Y, aclarando que en el eje X, se registra los datos del tiempo (hora y fecha), en la cual se registró la información.</p>
Comment		Información (comentarios sobre código)	Permite incluir una línea de comentarios para incluir información sobre el código de programación (diagrama de flujo).

Fuente: Autor e investigadores.



Según lo presentado en la tabla 38, es necesario configurar los bloques de programación con el fin de generar las funciones requeridas para el despliegue de la información de las estaciones de monitoreo, en lo referente a los datos de pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, para este fin se creó un diagrama de flujo (flow) en el entorno de trabajo de Node-RED Dashboard, este diagrama de flujo fue llamado: “Estaciones”. A continuación, se presenta la descripción de cada uno de los bloques que conforman este código de programación.

El primer paso consistió en asociar el diagrama de flujo denominado “Estaciones” realizado en Node-RED, con la aplicación app-calidad-agua, configurada en la plataforma TTN. La siguiente figura presenta la evidencia de esta configuración, donde fue necesario incluir los siguientes elementos de identificación:

- App ID: nombre de la aplicación en la plataforma TTN, para este caso “app-calidad-agua”.
- Access Key: identificación de acceso de la plataforma TTN para el caso específico de la aplicación “app-calidad-agua” equivalente a el campo “Access Keys” en TTN.
- Discovery address: corresponde a la identificación de la región a la cual se encuentra ligada la configuración de la comunicación del Gateway Multitech.

Los parámetros anteriores fueron previamente determinados y generados en la etapa de creación de la aplicación “app-calidad-agua” y que se ilustra mediante la Figura 15. Vista general de la aplicación: app-calidad-agua en TTN.

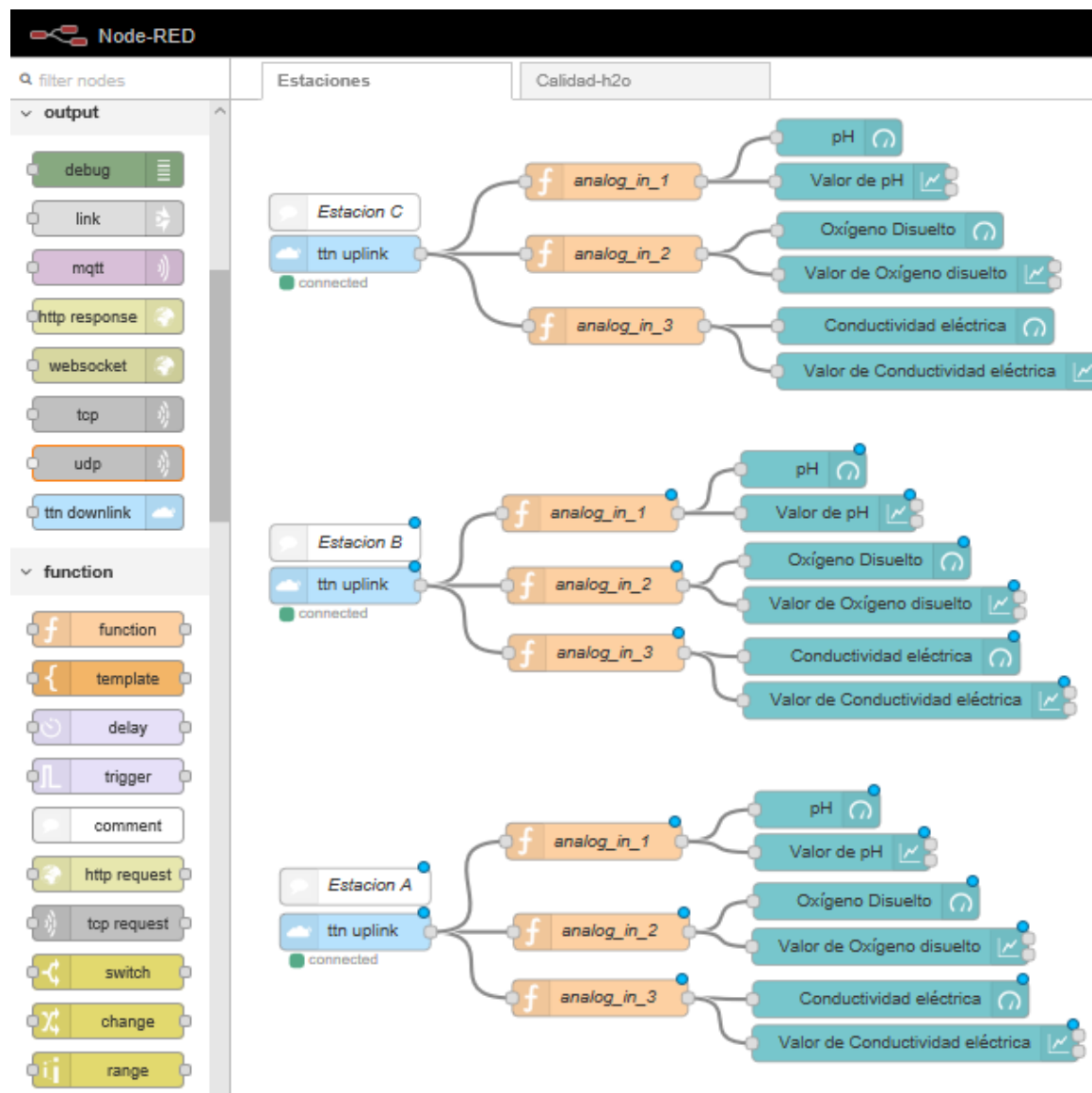
Figura 32. Integración app-calidad-agua con Estaciones en Node-RED

The screenshot shows a web interface for editing a TTN app node. At the top, there is a breadcrumb trail: "Edit ttn uplink node > Edit ttn app node". Below this, there are three buttons: "Delete", "Cancel", and "Update" (which is highlighted in red). The main configuration area contains three fields: "App ID" with the value "app-calidad-agua", "Access Key" with a masked value represented by dots, and "Discovery address" with the value "discovery.thethingsnetwork.org:1900".

Fuente: Autor e investigadores.

Luego de crear el espacio de trabajo para el diagrama de flujo denominado “Estaciones”, se procedió a crear las funciones para el desarrollo de la programación que permitió visualizar los datos de las variables de pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto. La siguiente imagen, presenta la estructura general del diagrama de flujo Estaciones.

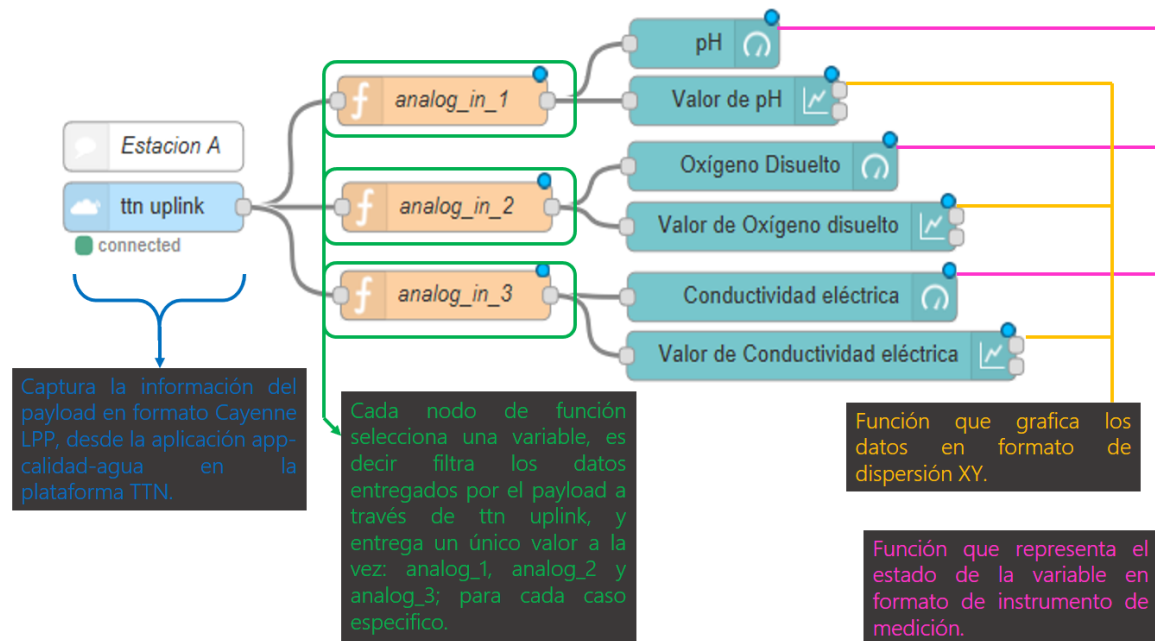
Figura 33. Diagrama de flujo: Estaciones en Node-RED



Fuente: Autor e investigadores.

En la figura anterior se presenta el esquema general del diagrama de flujo tipo NodeRed, requerido para capturar los datos de las variables de: pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, desde la plataforma TTN. A continuación, se presenta a descripción de cada una de las funciones que componen el diagrama de flujo.

Figura 34. Descripción del diagrama de flujo de Estaciones



Fuente: Autor e investigadores.

La descripción presentada en la figura anterior se repite para el caso de las estaciones B y C.

### Configuración de nodos de programación

A continuación, se presenta la configuración de cada uno de los bloques que conforma el diagrama de flujo.

#### a. Adquisición de payload desde TTN:

Para realizar esta función, se emplea la función ttn uplink.



La configuración de este bloque de programación requiere que se especifique la aplicación en TTN, a la cual estará asociada y el nombre del dispositivo del cual se tomarán los datos en este caso, para la estación a se utilizó el dispositivo LoPy, identificado como lopy-4.

- App: app-calidad-agua
- Device ID: lopy-4

Figura 35. Configuración de ttn uplink para Estación A

Edit ttn uplink node

Delete

Cancel

Done

▼ node properties

Name

Name

App

app-calidad-agua

▼

Device ID

lopy-4

Field

Fuente: Autor e investigadores

Lo que se presenta en la figura 35 se repitió para la configuración de las estaciones B y C respectivamente, de igual forma se configuraron los parámetros correspondientes para cada estación, según lo que se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 39. Configuración de función ttn uplink por estación

Estación	App	Device ID
<div>Estación A</div> <div><div><div></div><div>ttn uplink</div><div></div></div></div>	app-calidad-agua	lopy-4
<div>Estación B</div> <div><div><div></div><div>ttn uplink</div><div></div></div></div>	app-calidad-agua	lopy-01
<div>Estación C</div> <div><div><div></div><div>ttn uplink</div><div></div></div></div>	app-calidad-agua	lopy-02

Fuente: Autor e investigadores.






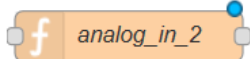
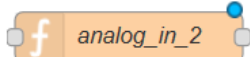
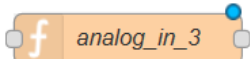



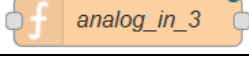
b. Lectura independiente de las variables análogas:

Una vez configurada la función para adquirir el payload desde TTN, fue necesario filtrar sus datos para captar en cada caso los datos de las tres variables análogas (pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto), empleando tres bloques de la función “function node”.



Los procedimientos descritos en la siguiente tabla, en lo correspondiente a la lectura independiente de las variables análogas, se repitió para las estaciones A, B y C, guardando los parámetros de configuración específicos para cada caso.

Tabla 40. Lectura de variables análogas a través de “function node”

Estación	Lectura de variables análogas	Dato en payload	Código para lectura de variable análogas
Estación A 	 analog_in_1	pH	msg.payload=msg.payload.analog_in_1; return msg;
	 analog_in_2	Oxígeno disuelto	msg.payload=msg.payload.analog_in_2; return msg;
	 analog_in_3	Conductividad eléctrica	msg.payload=msg.payload.analog_in_3; return msg;
Estación B 	 analog_in_2	pH	msg.payload=msg.payload.analog_in_1; return msg;
	 analog_in_2	Oxígeno disuelto	msg.payload=msg.payload.analog_in_2; return msg;
	 analog_in_3	Conductividad eléctrica	msg.payload=msg.payload.analog_in_3; return msg;
Estación C 	 analog_in_1	pH	msg.payload=msg.payload.analog_in_1; return msg;
	 analog_in_2	Oxígeno disuelto	msg.payload=msg.payload.analog_in_2; return msg;
	 analog_in_3	Conductividad eléctrica	msg.payload=msg.payload.analog_in_3; return msg;

Fuente: Autor e investigadores.

#### c. Configuración de funciones para visualización de datos:

Para la presentación de los datos se utilizaron los bloques de programación: gauge y chart, cuya descripción se incluyó en la tabla 38. A continuación se muestran las evidencias de la configuración de los dos bloques de programación mencionados para el caso de la variable pH de la estación de monitoreo A.

##### – Bloque gauge:

Este bloque permite representar en formato de un instrumento de medición los valores obtenidos de la variable de pH, la siguiente tabla presenta los parámetros de configuración de acuerdo al alcance y rangos de medición de los valores de la variable.

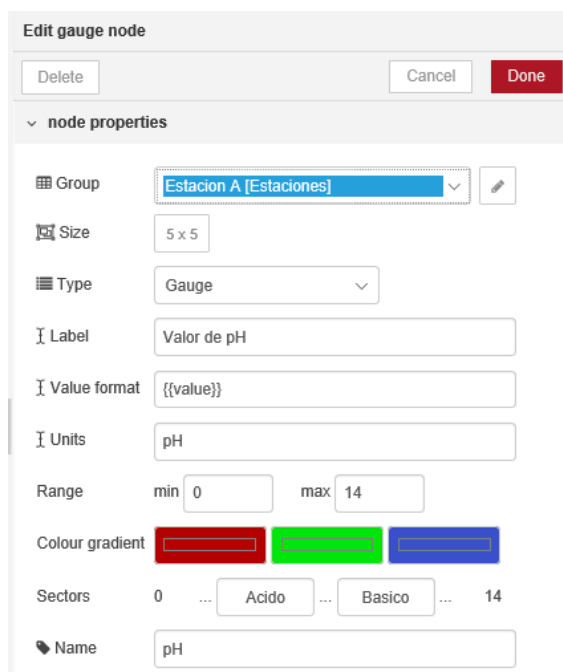
Tabla 41. Configuración de función gauge para pH

Característica	Descripción
Unidades de la variable:	pH
Rango:	0 a 14
Alcance:	14
Rango de valores	Rango de color
Acido: 0 a 6,4	Rojo
Neutro: 6,5 a 9,0 (apto para consumo humano)	Verde
Básico: 9,1 a 14	Azul

Fuente: Autor e investigadores.

A continuación, se incluye el menú de configuración de la función gauge para la visualización de la medición de pH.

Figura 36. Configuración de bloque gauge para visualización de pH



The image shows a software configuration window titled "Edit gauge node". At the top, there are three buttons: "Delete", "Cancel", and "Done". Below this is a section labeled "node properties" with a dropdown arrow. The properties are configured as follows:

- Group:** A dropdown menu showing "Estacion A [Estaciones]".
- Size:** A text box containing "5 x 5".
- Type:** A dropdown menu showing "Gauge".
- Label:** A text box containing "Valor de pH".
- Value format:** A text box containing "{{value}}".
- Units:** A text box containing "pH".
- Range:** Two text boxes labeled "min" and "max" containing "0" and "14" respectively.
- Colour gradient:** Three color swatches: red, green, and blue.
- Sectors:** A series of text boxes: "0", "...", "Acido", "...", "Basico", "...", "14".
- Name:** A text box containing "pH".

Fuente: Autor e investigadores.

La siguiente imagen presenta el resultado de la configuración de pH en la estación A.

Figura 37. Visualización del valor de pH en la Estación A



Fuente: Autor e investigadores.

- Bloque chart:

Al igual que el bloque de programación gauge, este bloque se utiliza para graficar los datos de la variable análoga (eje y) en función del tiempo (eje x), la siguiente figura muestra el menú de configuración de este bloque de programación.

Figura 38. Configuración de bloque chart para visualización de pH

Fuente: Autor e investigadores.

La siguiente imagen, presenta el resultado de la configuración de pH en la estación A, en forma de gráfica.

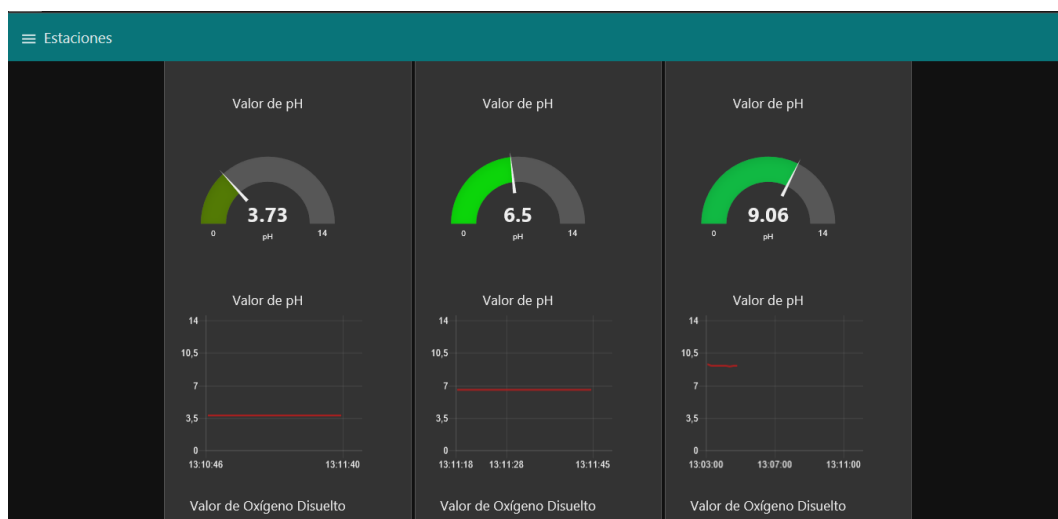
Figura 39. Gráfica del valor de pH en la Estación A respecto al tiempo



Fuente: Autor e investigadores.

Los bloques de gauge y chart fueron utilizados para las tres estaciones de monitoreo A, B y C, y para cada una de las tres variables: pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto en cada una de las tres estaciones de monitoreo mencionadas, las siguientes imágenes evidencian la adquisición de los datos desde la plataforma TTN en el espacio de trabajo de Node-RED.

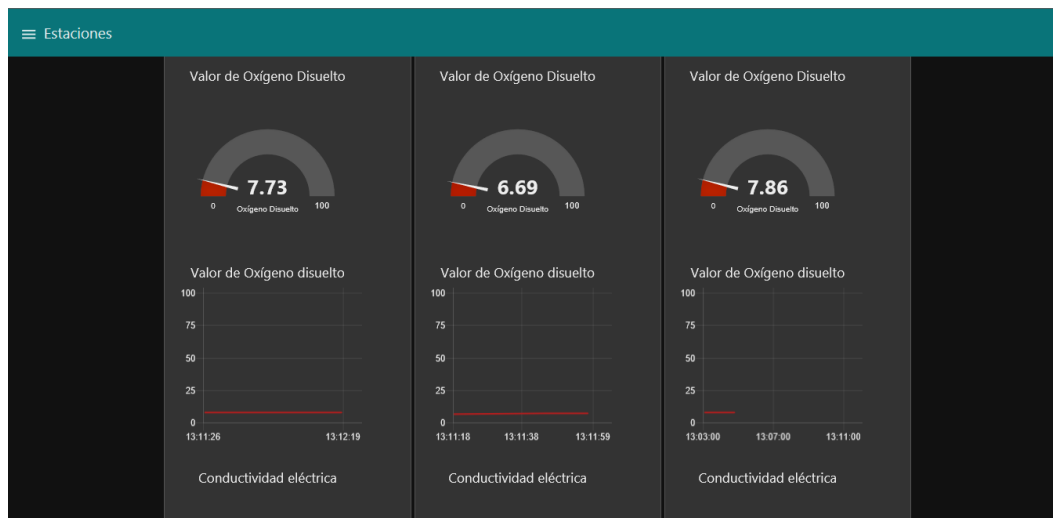
Figura 40. Variable pH en las estaciones de monitoreo A, B y C



Fuente: Autor e investigadores.



Figura 41. Variable oxígeno disuelto en las estaciones de monitoreo A, B y C



Fuente: Autor e investigadores.

#### 3.4.12 Instalaciones de las Estaciones de Monitoreo en Campo.

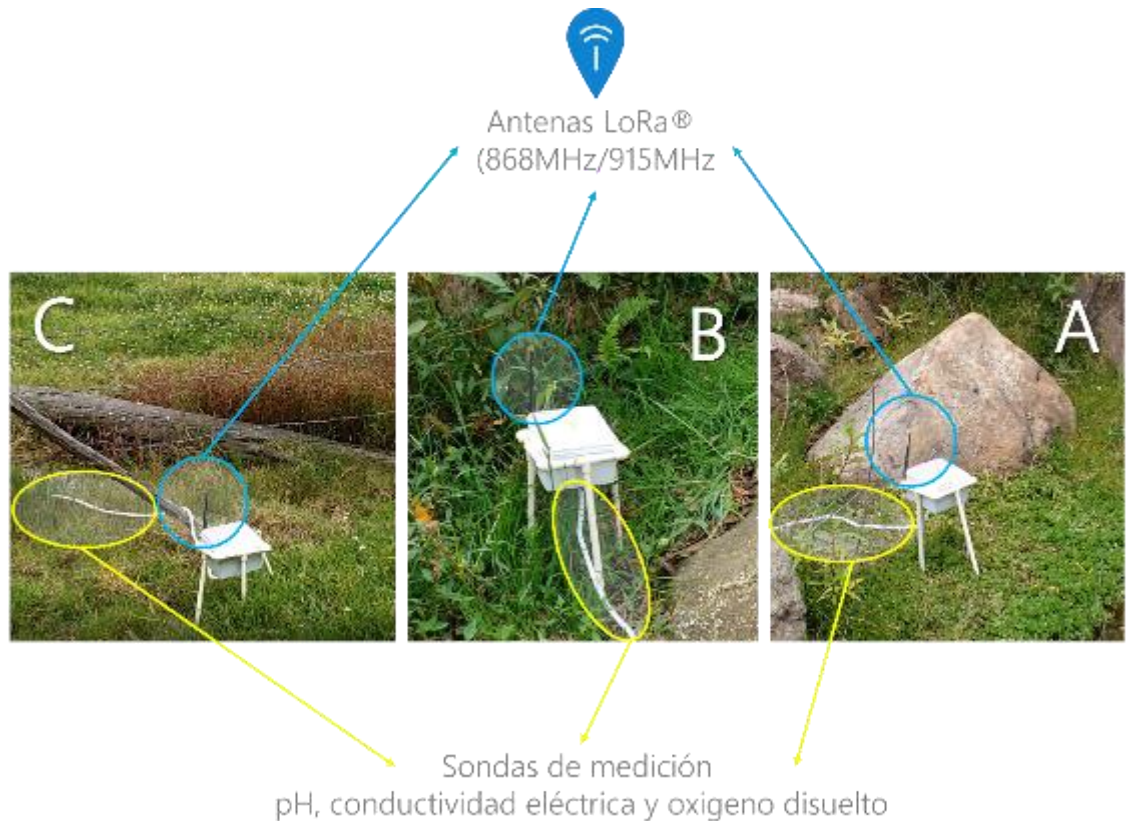
En el numeral 3.2, correspondiente a la caracterización del estudio de caso, se determinó la ubicación de las estaciones de monitoreo a lo largo del cauce de la quebrada, considerando la ubicación del Relleno Sanitario de Pirgua, sobre dicha quebrada, lo anterior se especificó en el numeral citado y su ubicación en terreno se presentó en la Figura 4, la siguiente figuras ilustran la ubicación de dichas estaciones de monitoreo a lo largo de cauce de la quebrada en los puntos geográficos ya mencionados.

Figura 42. Estaciones de monitoreo ubicadas en terreno



Fuente: Autor e investigadores.

Figura 43. Estaciones de monitoreo A, B y C, ubicadas en terreno



Fuente: Autor e investigadores.

### 3.5. PARÁMETROS DE CALIDAD SEGÚN NORMATIVIDAD

Según lo expuesto en las consideraciones para el despliegue de la solución de monitoreo (numeral 3.3.4), cada una de las estaciones de monitoreo dispuestas en campo (A, B y C) se comunica con la estación principal, que a su vez envía la información proveniente de cada estación de monitoreo a un sistema de información que orquesta las plataformas para Internet de las Cosas: The Things Network y Cayenne myDevices; lo cual permite al sistema generar reportes de incidencias, las cuales podrían ser adoptadas por parte de autoridad ambiental y del operador del Relleno Sanitario de Pírgua, como herramienta de trabajo y soporte a la toma de decisiones.

El trabajo realizado permitió identificar que para la toma de decisiones por parte de la autoridad ambiental competente, es necesario dar cumplimiento con lo establecido según: las disposiciones legales vigentes en Colombia, los estándares internacionales, las directrices apropiadas por parte de institutos ambientales y los referentes teóricos y referenciales pertinentes para el análisis del estudio de caso; en consecuencia, a partir de las especificaciones normativas se sintetizó la información sobre los niveles de tolerancia y su correspondiente interpretación

respecto al estado de las variables de: pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, para así determinar la calidad del recurso hídrico de la quebrada “Las Cebollas”, en cada uno de los tres puntos de monitoreo.

A continuación, se relaciona la información sobre los estados permitidos para cada una de las variables consideradas en el estudio de caso, tomando en cuenta los parámetros normativos para las características físicas del agua.

### 3.5.1. Estados Permitidos para pH.

Para establecer la tabla de referencia y soporte para la toma de decisiones, en lo correspondiente al estado de las variable pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, y las demás consignadas en la Tabla 1, se tomó como referencia los parámetros establecidos en el Artículo 4° del Capítulo II, de la Resolución 2115, emitida por los Ministerios de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, y el Ministerio de la Protección Social<sup>113</sup>, de igual manera se tomaron en cuenta los parámetros establecidos internacionalmente y consignados tanto en el manual de procedimiento técnicos Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater<sup>114</sup>, como los referentes expuestos por KENNETH M, Vigil, en el libro Clean water: an introduction to water quality and water pollution control<sup>115</sup>. La siguiente tabla, relaciona la información pertinente sobre los estados permitidos para la variable pH.

Tabla 42. Estados permitidos para pH según normatividad

Variable	Frecuencia de monitoreo		Niveles permitidos	Justificación como indicador de riesgo	Prevención (Acción a implementar)
	≤ 15 TM/día	≥ 15 TM/día			
pH	A	S	Para el consumo humano el valor del pH del agua debe estar comprendido en el rango entre 6.5 y 9.  (Capítulo II, Artículo 4°, Resolución 2115)	Valores fuera del rango indicado suponen riesgo para la salud humana si el recurso hídrico es utilizado para el consumo humano.  Valores de pH inferiores a 6.5, indican que la composición del agua está tendiendo hacia la acidez; mientras que los valores superiores a 9, son indicadores de presencia de agentes en el agua como: amoníaco, jabón, blanqueadores, y limpiadores, entre más se acerque el valor del pH a 14, la sustancia se considera básica (alcalina).	Implementar sistemas de monitoreo automático y puntual.

<sup>113</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL Y MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. Resolución 2115 (22, junio, 2007). Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2007. no. 46679. p. 1-26.

<sup>114</sup> AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION®; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION® y WATER ENVIRONMENT FEDERATION® (Estados Unidos). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22 ed. Washington DC.: American Public Health Association. 2012. 1496 p. ISBN 9780875530130.

<sup>115</sup> KENNETH M, Vigil. Clean water: an introduction to water quality and water pollution control. 2 ed. Corvallis.: Oregon State University Press, 2003. ISBN 0-87071-498-8.

Variable	Frecuencia de monitoreo		Niveles permitidos	Justificación como indicador de riesgo	Prevención (Acción a implementar)
	≤ 15 TM/día	≥ 15 TM/día			
				Un valor de pH, del orden de 11, indica la presencia de amoníaco, lo cual es un indicador de posible de contaminación del agua y la presencia de microorganismos patógenos.	

Fuente: Autor e investigadores.

### 3.5.2. Estados Permitidos para Conductividad Eléctrica.

Para este caso se tomaron como referencia los mismos estamentos considerados para el caso del estado permitido para el pH según la normatividad vigente.

Tabla 43. Estados permitidos de conductividad eléctrica según normatividad

Variable	Frecuencia de monitoreo		Niveles permitidos	Justificación como indicador de riesgo	Prevención (Acción a implementar)
	≤ 15 TM/día	≥ 15 TM/día			
Conductividad eléctrica	B	A	El valor máximo permitido es de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; el valor se puede ajustar según los promedios habituales de la zona y el mapa de riesgo.	Se considera que un incremento superior al 50% se debe a un incremento en la cantidad de sólidos disueltos en el agua y amerita un proceso de investigación inmediato por parte de las autoridades sanitarias y ambientales y la persona prestadora que suministra o distribuye agua para consumo humano.  La conductividad eléctrica en el agua está relacionada con el contenido iónico a razón de la concentración de sólidos disueltos (ionizables), por lo tanto, es un indicador de alcalinidad (parámetro relacionado con la medición de pH), ya que demuestra la presencia de sólidos disueltos del agua, aunque si los sólidos disueltos son de origen vegetal, no se presentaran valores significativos de conductividad. A partir del valor de la conductividad se puede estimar la cantidad de solidos disueltos en el agua, mediante la siguiente Ecuación: Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) $\times 2/3 =$ Sólidos disueltos totales (mg/l).	Implementar sistemas de monitoreo automático y puntual.

Fuente: Autor e investigadores.

### 3.5.3. Estados Permitidos para Oxígeno Disuelto.

Al igual que para los casos de los estados permitidos, la revisión de los referentes teóricos y normativos permitió establecer la siguiente tabla que se constituye como

herramienta de apoyo para la toma de decisiones en lo que compete al estado de la variable oxígeno disuelto para afluentes superficiales como recurso hídrico.

Tabla 44. Estados permitidos para oxígeno disuelto según normatividad

Variable	Frecuencia de monitoreo		Niveles permitidos	Justificación como indicador de riesgo	Prevención (Acción a implementar)
	≤ 15 TM/día	≥ 15 TM/día			
Oxígeno disuelto	A	S	Se refiere a la cantidad de oxígeno gaseoso presente en el cuerpo de agua, a raíz de la mezcla del agua con el aire, por lo tanto, este parámetro depende de la velocidad del flujo del agua a través de cauce del afluente, de tal forma que los afluentes cuya velocidad de flujo es reducida presentan menos concentración de oxígeno, sin embargo, aun si la velocidad del flujo de agua en el afluente es baja, el oxígeno de la atmósfera se disolverá del agua.	<p>Entre menor sea la cantidad de oxígeno disuelto en el agua, se convierte en un indicador que peces y otros organismos acuáticos no tendrán las condiciones adecuadas para existir.</p> <p>Cuando el recurso hídrico se contamina con compuestos de carbono y nitrógeno, se presenta una reducción del oxígeno disuelto en el agua.</p> <p>La mayoría del recurso hídrico no contaminado, como el presente en alta montaña, ríos y riachuelos están saturados entre 95% y 100% con oxígeno disuelto.</p> <p>Una mayor concentración de oxígeno disuelto indica una mejor calidad del recurso hídrico, entre menor sea esta concentración, se puede afirmar que existen menos condiciones para la vida de organismos acuáticos y por ende se convierte en un indicador de la presencia de agentes contaminantes.</p>	Implementar sistemas de monitoreo automático y puntual.

Fuente: Autor e investigadores.

### 3.5.4 Estados Permitidos para Otras Variables.

Como se presentó en la Tabla 1, adicional a las variables: pH, oxígeno disuelto y conductividad, existen otras variables que también son indicadores de calidad del recurso hídrico, a saber: contracción de metales pesados, demanda química de oxígeno, amoníaco, nitritos y nitratos, es importante resaltar que, para el caso del amoníaco, puede identificarse a partir de la medición del pH en el agua, tal como se indica en la tabla 45, en el apartado correspondiente.

Tabla 45. Estados permitidos normativamente para otras variables

Variable	Frecuencia de monitoreo		Niveles permitidos	Justificación como indicador de riesgo	Prevención (Acción a implementar)
	≤ 15 TM/día	≥ 15 TM/día			
			Valores máximos aceptables expresados en mg/L Antimonio (Sb): 0.02 Arsénico (As): 0.01 Bario (Ba): 0.7	Para valores superiores a los valores máximos permitidos, se considera que el recurso hídrico no es apto para el consumo humano, ya que puede derivar en	Implementar sistemas de monitoreo manual y compuesta.

Variable	Frecuencia de monitoreo		Niveles permitidos	Justificación como indicador de riesgo	Prevención (Acción a implementar)
	≤ 15 TM/día	≥ 15 TM/día			
Metales pesados	A	S	Cadmio (Cd): 0.003 Cianuro libre y disociable (CN <sup>-</sup> ): 0.05 Cobre (Cu): 1.0 Cromo total (Cr): 0.05 Mercurio (Hg): 0.001 Níquel (Ni): 0.02 Plomo (Pb): 0.01 Selenio (Se): 0.01 Aluminio (Al <sup>3+</sup> ): 0.2 Hierro total (Fe): 0.3 Magnesio (Mg): 36 Manganeseo (Mn): 0.1 Molibdeno (Mo): 0.07 Zinc (Zn): 3	<p>consecuencias indirectas sobre la salud humana.</p> <p>Niveles superiores a los máximos admitidos, se consideran tóxicos para la salud humana y para la pesca (este aspecto no es relevante para el estudio de caso, ya que no se realiza la pesca).</p> <p>Cromo: agente tóxico, ya sea trivalente o hexavalente, el cual es más tóxico para la salud humana y es difícil distinguir.</p> <p>Cobre: si bien no es el agente más tóxico, concentraciones superiores a 1 mg/l, de este metal puede generar sabores astringentes en el agua.</p> <p>Mercurio: puede ser generado por descargas y desechos provenientes de sectores industriales, o residuos derivados de este tipo de procesos, como: amalgamas dentales, fabricación de plásticos, fabricación de papel, entre otros, se considera altamente tóxico.</p>	
DQO (Demanda química de oxígeno)	A	S	Esta variable es un indicador de la cantidad de sustancias que pueden ser oxidadas (de forma química), y que se encuentran disueltas o en suspensión en el cuerpo del recurso hídrico.	<p>La medición de DQO, mide la cantidad de material orgánico presente en una muestra de agua. Este parámetro también se puede determinar a partir de la medición del nivel de la demanda de oxígeno.</p> <p>El proceso de oxidación química en el agua puede ser realizado por bacterias, pero también podrá ser causado por la presencia de agentes químicos en el agua.</p> <p>La demanda química de oxígeno elimina el nivel de oxígeno disuelto, lo cual supone un riesgo para la vida de peces y organismos acuáticos en general. El nivel de oxígeno disuelto puede verse afectado cuando la temperatura incrementa, debido a que las bacterias crecen más rápidamente y esto implica que se requiere más oxígeno.</p>	Implementar sistemas de monitoreo manual y compuesta.
Amoníaco	B	A	El valor de la concentración de amoníaco en el agua puede ser estimado mediante la medición del pH en el agua. De forma estandarizada el nivel de pH que indica la presencia del amoníaco es aproximadamente 11.	<p>La presencia de amoníaco en el agua es un indicador de la descarga de nitrógeno orgánico, que a su vez indica contaminación en el agua debido a la pérdida de oxígeno en la misma durante procesos de biodegradación.</p> <p>Como se mencionó para el caso del pH, un valor del orden de 11, indica la presencia de amoníaco, lo cual es un indicador de posible contaminación del agua y la presencia de microorganismos patógenos.</p>	Implementar sistemas integral y puntual, apoyada en el muestreo de la variable pH.



Variable	Frecuencia de monitoreo		Niveles permitidos	Justificación como indicador de riesgo	Prevención (Acción a implementar)
	≤ 15 TM/día	≥ 15 TM/día			
Nitritos NO <sub>2</sub> -	A	S	Valor máximo aceptable en el agua para consumo humano: 0.1 mg/L	<p>De superarse el nivel máximo aceptable, implica la existencia de implicaciones negativas sobre la salud humana.</p> <p>Por lo general la concentración de nitritos es baja, ya que el nitrógeno existe principalmente en formas de amoníaco o sustancias más oxidadas como el nitrato, ya que es un punto intermedio ente la oxidación de amoníaco a nitrato.</p> <p>La oxidación se puede producir en el suelo debido a que las aguas residuales son fuente de nitrógeno amoniacal, entre mayor sea la concentración de nitritos en el agua se considera que la calidad del recurso hídrico no es la adecuada. Los niveles en aguas no contaminadas son normalmente inferiores a 0.03 mg/l, mientras que valores mayores a este pueden indicar contaminación generadas por aguas residuales.</p>	Implementar sistemas de monitoreo manual y compuesta.
Nitratos NO <sub>3</sub> -	B	A	Valor máximo aceptable en el agua para consumo humano: 10 mg/L.	<p>De superarse el nivel máximo aceptable, significa la existencia de implicaciones negativas sobre la salud humana.</p> <p>La concentración de nitratos en el agua puede provenir tanto de fuentes orgánicas como inorgánicas; las orgánicas pueden ser generadas por descargas de desechos y las inorgánicas por fertilizantes de origen artificial. La oxidación bacteriana y la fijación del nitrógeno de las plantas también pueden producir nitrato. La concentración de nitratos se considera un parámetro para la medición de la calidad del agua, ya que de ser suministrada a lactantes en niveles superiores a 11 mg/l de N (50 mg/l de NO<sub>3</sub>), puede generar el síndrome del bebe azul (metahemoglobinemia). La concentración de nitratos supone un peligro para la salud debido a su conversión a nitrito.</p>	Implementar sistemas de monitoreo manual y compuesta.

Fuente: Autor e investigadores.

## 4. RESULTADOS OBTENIDOS

El trabajo desarrollado permitió obtener los resultados que se describen en este capítulo y que dan cumplimiento al objetivo general propuesto con relación al estudio de caso: “Desarrollar un sistema de supervisión de la calidad de caudales superficiales, basado en el paradigma de Internet de las Cosas, a partir de la normatividad ambiental vigente”, a continuación, se relacionan estos resultados.

---

### Resultado 1:

---

Se identificaron las variables susceptibles de monitoreo para el desarrollo de la actividad de supervisión de la calidad del agua en la fuente hídrica de la quebrada “Las Cebollas”, considerando la normatividad ambiental vigente en Colombia y los instrumentos de medición compatibles con plataformas IoT, este resultado se incluyó en el capítulo 6, correspondiente al marco referencial, y de manera específica en los títulos correspondientes a marco: conceptual, teórico, legal y estado del arte; donde se exponen los diferentes aspectos a partir de los cuales se desarrolló de la solución tecnológica propuesta.

Para identificar las variables susceptibles de monitoreo a través de la incorporación de plataformas IoT, se consultó el Decreto 838 de 23 de marzo de 2005<sup>116</sup>, el cual indica las variables que deben ser monitoreadas en acuíferos y la frecuencia en que se debe realizar dicho monitoreo según la normatividad ambiental establecida en Colombia (Tabla 1).

A partir de las consideraciones de diseño expuestas en el capítulo 3, en los numerales: 3.3.10. Consideraciones para la medición en campo, 3.4.3. Variables susceptibles de medición en campo para el estudio de caso y 3.4.5. Circuitos y plataformas para adquisición de datos, se logró seleccionar los instrumentos de medición para las variables: pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, debido a que existen sondas de medición a bajo costo y que cumplen con los estándares de calidad y certificaciones requeridas para realizar una medición continua y con las características de confiabilidad requeridas por la aplicación en el estudio de caso, y así mismo se identificaron las plataformas IoT para la adquisición y transmisión de los datos medidos a través de los instrumentos electrónicos respectivos.

Los aspectos que evidencian el Resultado 1 dentro del presente trabajo, se resumen en las siguientes tablas:

---

<sup>116</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 838 (23, marzo, 2005). Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2005. no. 45862. p. 1-15.



Tabla 46. Variables e instrumentos de medición seleccionados

VARIABLES A MONITOREAR	INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA REQUERIDA	CERTIFICACIÓN	CONECTIVIDAD I/O	INFORMACIÓN ADICIONAL
pH	Sonda de medición y circuito de acondicionamiento EZO Ph (Atlas Scientific)	RoHS	UART, i <sup>2</sup> C (Compatible con plataformas Pycom para desarrollo de aplicaciones IoT)	Medición in situ y continua. Exactitud:± 0.002
Conductividad eléctrica	Sonda de medición y circuito de acondicionamiento EZO EC Atlas Scientific)	RoHS	UART, i <sup>2</sup> C (Compatible con plataformas Pycom para desarrollo de aplicaciones IoT)	Medición in situ y continua. Exactitud:± 2%
Oxígeno disuelto	Sonda de medición y circuito de acondicionamiento EZO DO Atlas Scientific)	RoHS	UART, i <sup>2</sup> C (Compatible con plataformas Pycom para desarrollo de aplicaciones IoT)	Medición in situ y continua. Exactitud:± 0.05 mg/L.

Fuente: Autor e investigadores.

La siguiente tabla muestra las características principales de los dispositivos y plataformas IoT, seleccionadas para la adquisición y transmisión de los datos correspondientes a las mediciones de pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, entregadas por los circuitos de acondicionamiento de señal EZO, pH, EC y DO respectivamente, por cada una de las tres estaciones de monitoreo dispuestas a lo largo del cauce de la quebrada “Las Cebollas”, cuyas ubicaciones se determinaron a partir de la locación del relleno sanitario de Pirgua y su influencia sobre dicha quebrada, estos aspectos se relacionan en detalle en el apartado correspondiente al Resultado 4.

Tabla 47. Plataformas IoT seleccionadas

DISPOSITIVO	PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN	CONECTIVIDAD I/O	INFORMACIÓN ADICIONAL
Microcontrolador LoPy 1 - Pycom	802.11b/g/n 16mbps, LoRaWAN™, Semtech LoRa® transceiver SX1272, LoRaWAN™ stack, Class A and C devices	UART, SPI, I <sup>2</sup> C, I <sup>2</sup> S	<ul style="list-style-type: none"> <li>Compatible con tarjetas de expansión y bajo consumo de energía de Pycom.</li> <li>El dispositivo puede ser registrado en plataformas para desarrollo de aplicaciones IoT, como TTN (The Things Network) y Cayenne myDevices.</li> </ul>
Expansion Board 2.0	LoRaWAN™, LoRa® Frecuencia de transmisión a 868-915 MHz a través de antenas LoRa®, compatible con la banda libre del espectro electromagnético en Colombia.	UART, SPI, I <sup>2</sup> C, I <sup>2</sup> S	Compatible con microcontroladores y tarjetas de bajo consumo de energía de Pycom
Tarjeta de bajo consumo (Deep Sleep Shield)	No aplica	UART, SPI, I <sup>2</sup> C, I <sup>2</sup> S	Compatible con microcontroladores y tarjetas de expansión de Pycom
Antena LoRa®	Frecuencia de transmisión a 868-915 MHz a través de antenas LoRa®, compatible con la banda libre del espectro electromagnético en Colombia.	No aplica	Compatible con tarjetas de expansión de Pycom
Gateway MultiTech modelo MTCDDT	Especificación 868-915 MHz LoRa®, para transmisión 915 MHz, debido a que maneja la misma especificación que la normatividad colombiana vigente para el uso de la banda de frecuencia libre.	No aplica	<ul style="list-style-type: none"> <li>Compatible con tarjetas de expansión de Pycom</li> <li>El dispositivo puede ser registrado en plataformas para desarrollo de aplicaciones IoT, como TTN (The Things Network).</li> </ul>

Fuente: Autor e investigadores

Lo anterior se logró a través de la revisión de la normatividad vigente y la bibliografía pertinente para el caso de la presente investigación, como producto de esta revisión

se determinaron los aspectos incluidos dentro del diseño y construcción de la solución tecnológica propuesta, que se detalló de forma amplia en el capítulo 3, en lo correspondiente a la solución tecnológica.

---

#### Resultado 2:

---

Partiendo de la necesidad de diseñar un sistema de supervisión de las variables identificadas, con la capacidad de generar alertas y estadísticas, de forma correspondiente con los márgenes técnicos y normativos ambientales, el trabajo entrega como resultado la construcción de las siguientes estaciones:

- Tres estaciones de monitoreo A, B y C, para ser ubicadas en campo a lo largo del cauce de la quebrada “Las Cebollas”.
- Una estación central de monitoreo para centralizar el tráfico de información proveniente de las estaciones de monitoreo A, B y C, enlazada con la aplicación app-calidad-agua en plataforma TTN.

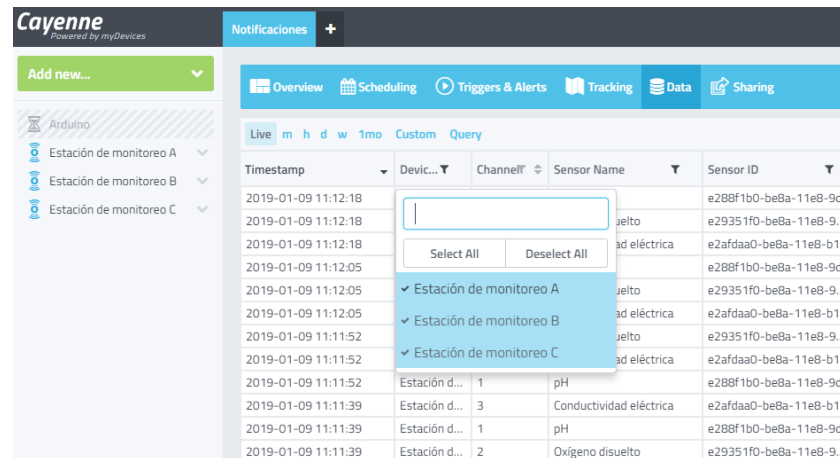
A continuación, se describen las funcionalidades incluidas dentro del sistema de las estaciones de monitoreo para dar cumplimiento con el objetivo trazado de generar alertas y estadísticas según los márgenes técnicos y normativos ambientales establecidos en Colombia.

Funciones del sistema de las estaciones de monitoreo A, B y C:

- a. Monitoreo de las variables de: pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, a través de mediciones realizadas cada 20 segundos, sin embargo, se aclara que el tiempo de muestreo puede ser modificado según la necesidad o el número de muestras que se deseen tomar en un determinado intervalo.
- b. Trasmisión de información correspondiente a las mediciones de: pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, a través de comunicación inalámbrica LoRa® a 915MHz, ya que, según la normatividad colombiana vigente, esta es la banda de frecuencia libre del espectro electromagnético, en la cual se pueden desarrollar este tipo de aplicaciones para propósitos académico- investigativos.
- c. Ahorro de consumo energético, debido a que cada estación incorpora una tarjeta de bajo consumo (Deep Sleep Shield), el sistema entra en modo de bajo consumo energético una vez el microcontrolador LoPy realiza la toma de las tres variables (pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto) correspondientes al estudio de caso.
- d. El sistema incluye herramientas de visualización en tiempo real de los valores de las variables de: pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, lo que permite realizar la actividad de supervisión requerida por el sistema, las

siguientes figuras presentan el panel de notificación generado desde la plataforma como servicio utilizado para el despliegue de la supervisión y generación de alertas requeridas para el estudio de caso.

Figura 44. Selección de información de estaciones de monitoreo en plataforma

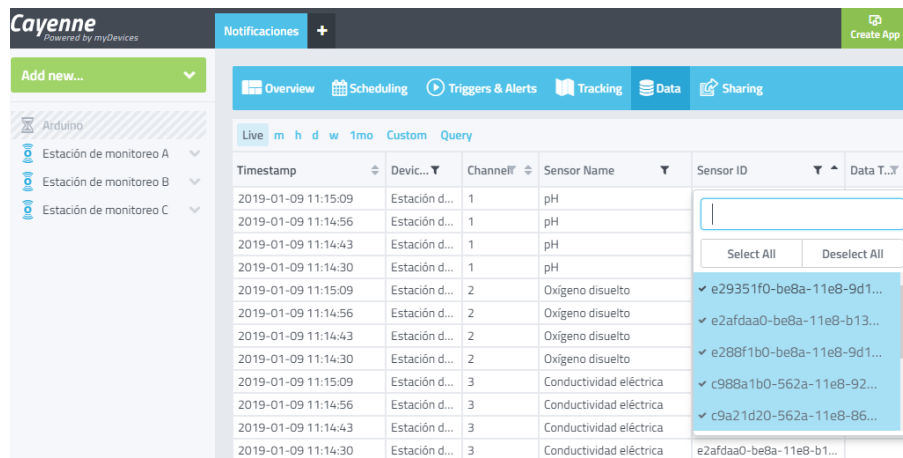


Fuente: Autor e investigadores.

La figura anterior presenta el panel de verificación de los datos adquiridos a través de cada una de las tres estaciones de monitoreo que se identifican en el campo "Device Name", las cuales a su vez adquieren la información de tres sensores de pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto respectivamente, parámetros a partir de los cuales la autoridad ambiental y el operador del relleno sanitario pueden verificar el estado de la calidad del recurso hídrico de la quebrada "Las Cebollas" en los tres puntos de monitoreo determinados; como se evidencia en la figura, la plataforma seleccionada permite obtener y filtrar la información proveniente de las estaciones de monitoreo A, B y C.

En la plataforma como servicio (PaaS) seleccionada, también es posible filtrar las consultas de la información a partir de la identificación suministrada por cada uno de los nueve sensores, recordando que cada estación de monitoreo está dotada de tres sensores (pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica); la siguiente figura presenta la opción de la plataforma para seleccionar la información correspondiente a cada uno de los sensores, los cuales se identifica a través del campo "Sensor ID".

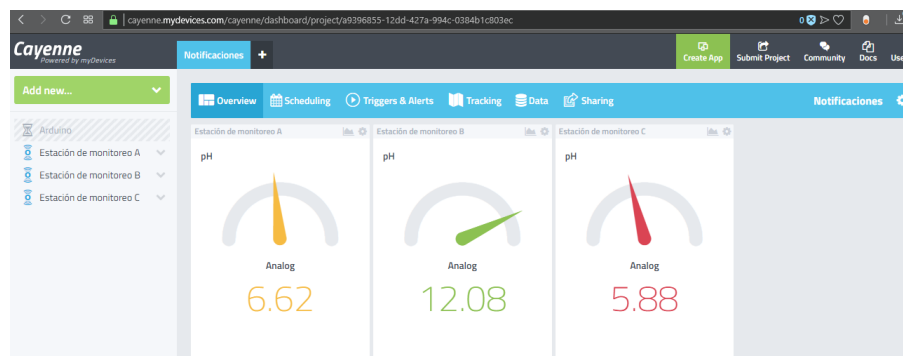
Figura 45. Selección de información de sensores en plataforma



Fuente: Autor e investigadores.

La plataforma seleccionada permitió la creación de un panel de verificación del estado de las tres estaciones y cada uno de los tres sensores asociados a cada estación, las siguientes figuras presentan las capturas en pantalla de estos elementos que permite monitorear en tiempo real el estado de los parámetros de calidad del recurso hídrico de la quebrada “Las Cebollas”.

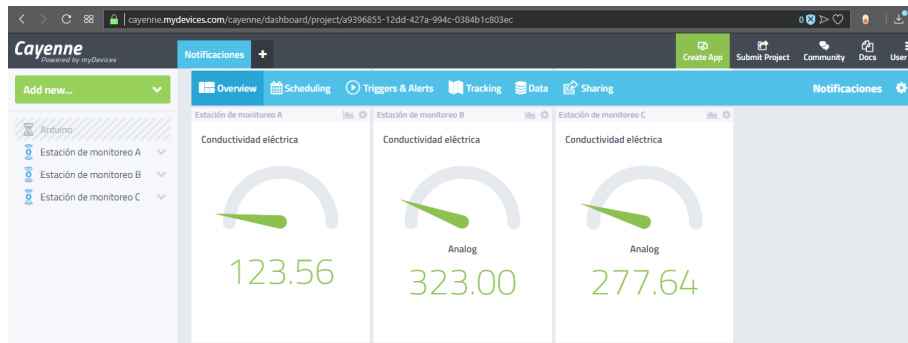
Figura 46. Panel de monitoreo parámetro de calidad: pH



Fuente: Autor e investigadores.

La medición de pH se expresa como un dato análogo en unidades de pH, de acuerdo con la configuración y calibración de los instrumentos electrónicos de medición EZO-pH™ de AtlasScientific™ (Environmental Robotics).

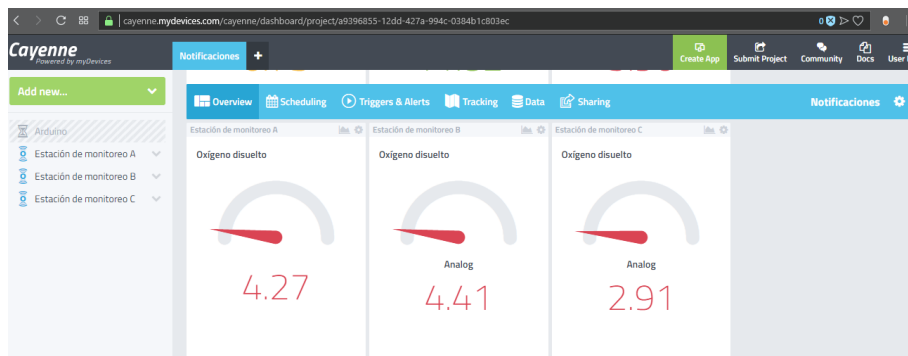
Figura 47. Panel de monitoreo parámetro de calidad: conductividad eléctrica



Fuente: Autor e investigadores.

La medición de conductividad eléctrica se expresa como un dato análogo en unidades de  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , de acuerdo con la configuración y calibración de los instrumentos electrónicos de medición EZO-EC™ de AtlasScientific™ (Environmental Robotics).

Figura 48. Panel de monitoreo parámetro de calidad: oxígeno disuelto



Fuente: Autor e investigadores.

La medición de oxígeno disuelto se expresa como un dato análogo en unidades de  $\text{mg}/\text{L}$ , de acuerdo con la configuración y calibración de los instrumentos electrónicos de medición EZO-DO™ de AtlasScientific™ (Environmental Robotics).

Adicional a lo expuesto en las figuras correspondientes a los paneles de monitoreo de los parámetros de calidad del recurso hídrico, el sistema permite al usuario la generación de gráficos de dispersión que permiten realizar un seguimiento detallado del comportamiento individual de cada variable durante periodos determinados por los siguientes intervalos:

Tabla 48. Configuración de intervalos para consulta de información

Tipo de registro para visualización	Intervalo de tiempo registrado	Descripción	Identificación en plataforma
Tiempo real	Registro inmediato de los datos adquiridos desde cada estación	Despliega la información en forma de grafica de dispersión cada vez que se genera un nuevo dato	Live
Minutos	Datos de últimos 10 minutos	Despliega los datos en forma de grafica de dispersión para el intervalo de tiempo señalado	m
Hora	Datos de últimos 60 minutos		h
Día	Datos de últimas 24 horas		d
Semana	Datos de últimos 7 días		w
Mes	Datos de últimos 30 días		1mo
Tres meses	Datos de últimos 3 meses		2mo
Seis meses	Datos de últimos 6 meses		3mo
Año	Datos de últimos 12 meses		1y
Personalizado	Definido por el usuario	Permite al usuario generar intervalos de tiempo (días) a través de selección de fechas de inicio y fin.	Custom

Fuente: Autor e investigadores.

Las siguientes figuras presentan ejemplos de las gráficas de dispersión (Dato Vs tiempo), generadas a partir de la adquisición de datos en cada una de las estaciones.

Figura 49. Gráfica de pH en estación de monitoreo A



Fuente: Autor e investigadores.

La medición de pH se expresa como un dato análogo en unidades de pH.

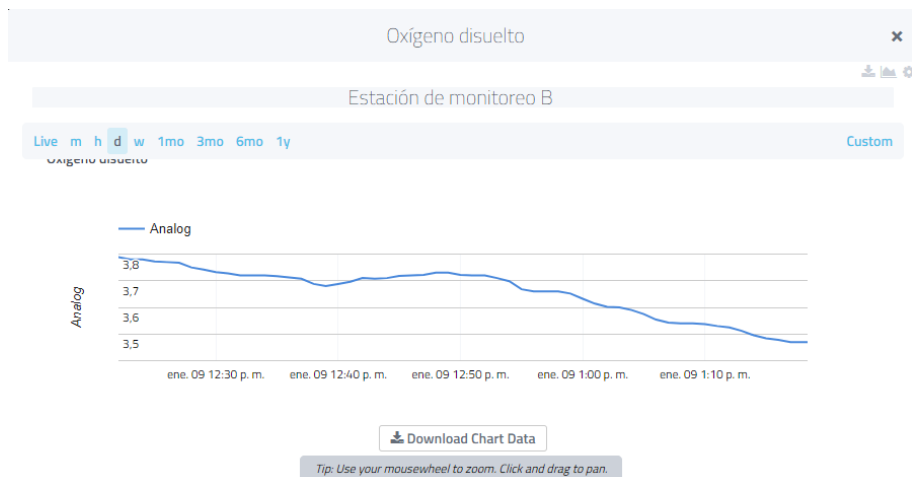
Figura 50. Gráfica de conductividad eléctrica en estación de monitoreo A



Fuente: Autor e investigadores.

La medición de conductividad eléctrica se expresa como un dato análogo en unidades de  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

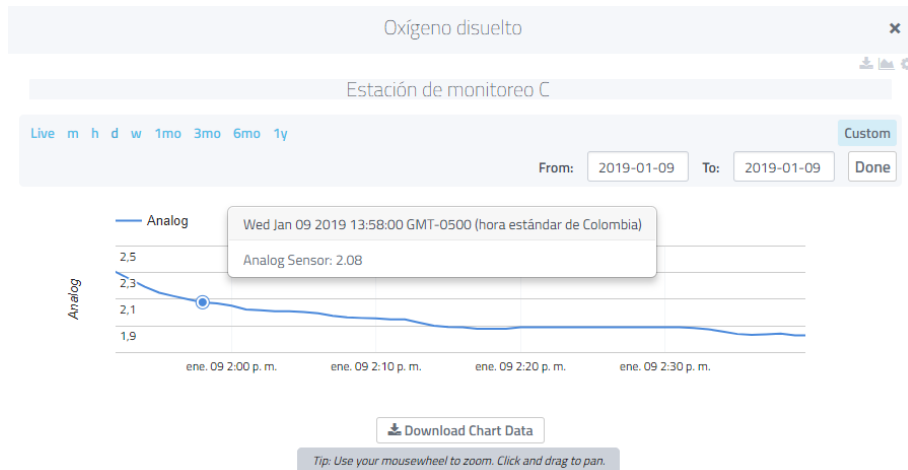
Figura 51. Gráfica de oxígeno disuelto en estación de monitoreo B



Fuente: Autor e investigadores.

La medición de oxígeno disuelto se expresa como un dato análogo en unidades de  $\text{mg}/\text{L}$ .

Figura 52. Gráfica de oxígeno disuelto en estación de monitoreo C



Fuente: Autor e investigadores.

La medición de oxígeno disuelto se expresa como un dato análogo en unidades de mg/L.

Según lo expuesto en este apartado correspondiente al resultado 2, el prototipo de solución tecnológica propuesto a través del trabajo desarrollado se podría llegar a adoptar como una herramienta de trabajo tanto para la autoridad ambiental, como para el mismo operador del relleno sanitario de Pírgua, dado que el cauce de la quebrada “Las Cebollas”, se encuentra dentro de la zona de influencia geográfica de dicho relleno, la anterior afirmación se justifica en que a partir de los datos adquiridos se podría llegar a las siguientes conclusiones, partiendo de las consideraciones y estados permitidos para las variables: pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, según la normatividad colombiana vigente, que se resume en los contenidos y especificaciones previamente incluidas en las tablas 42, 43, 44 y 45.

Tomando como ejemplo los datos de los parámetros de calidad del recurso hídrico de la quebrada “Las Cebollas”, presentados en las figuras 46 a la 48, se promueven las siguientes conclusiones:

Conclusión I:

Los datos presentados en la figura 46 presentan el valor de la medición de pH en un mismo instante en cada una de las tres estaciones de monitoreo y se registraron los siguientes valores:

- Valor de pH en estación de monitoreo A: 6,62 (aguas arriba)
- Valor de pH en estación de monitoreo B: 12,08 (dentro de zona de la influencia del relleno sanitario de Pírgua)
- Valor de pH en estación de monitoreo C: 5,88 (aguas abajo)



Esto permite inferir que según los estados permitidos para pH, el valor de esta variable se encuentra dentro del rango permitido entre 6.5 y 9; en lo que respecta a su uso para consumo humano, si bien este valor se encuentra cerca al rango mínimo permitido, se debe tener en cuenta que dentro de la zona donde se ubicó la estación de monitoreo y en general a lo largo del cauce de la quebrada, se encuentran diversos puntos donde se evidencia la existencia de vertimientos de materia orgánica, tránsito y pastoreo de animales de granja, entre otros factores que pueden incidir de forma directa en la calidad del recurso hídrico.

La estación de monitoreo B (que está ubicada de la zona de influencia del relleno sanitario de Pírgua sobre la quebrada “Las Cebollas”) registró un valor de pH de 12.08, lo cual indica que además de encontrarse fuera de rango permitido para esta variable (supera el rango máximo tolerado), en este punto el recurso hídrico presenta características que pueden generar riesgo para la salud humana siempre que sea consumido, según lo presentado en la Tabla 42, los valores superiores a 9, indican la presencia de agentes en el agua como: amoníaco, jabón, blanqueadores, y limpiadores, entre más cercano el valor de pH a 14, se considera que la sustancia tiende a ser considerada como alcalina.

Dado que el valor de pH en la estación de monitoreo B indica un valor superior a 11, se puede inferir que el recurso hídrico en este punto registra concentraciones de amónico, lo que indica la presencia de agentes contaminantes en el agua y de la posible existencia de microorganismos patógenos.

En el caso de la estación de monitoreo C, el sistema registró un valor de pH de 5.88, el cual se encuentra fuera del rango permitido por debajo del límite inferior permitido, lo cual indica que la composición del agua está tendiendo hacia la acidez, en este punto se evidencia que, a lo largo del cauce entre la estación B y la C, la alcalinidad del recurso hídrico se disipa, pero aún sigue siendo inadecuada para el consumo humano.

A partir de los resultados de la medición del pH en cada una de las tres estaciones, la autoridad ambiental y el operador del relleno sanitario de Pírgua, podrían adoptar y desplegar actividades de monitoreo automático y puntual, con el fin de determinar de manera específica las fuentes que originan estas situaciones en las estaciones B y C, que podrían ser a causa de la operación del relleno sanitario en determinadas circunstancias o fuentes emisoras de contaminación presentes a lo largo del cauce de la quebrada.

## Conclusión II:

Respecto a los valores de conductividad eléctrica en el agua, en las estaciones de monitoreo se registran los siguientes datos:

- Valor de conductividad eléctrica en estación de monitoreo A: 123,56  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (aguas arriba)

- Valor de conductividad eléctrica en estación de monitoreo B: 323,00  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (dentro de zona de la influencia del relleno sanitario de pargua)
- Valor de conductividad eléctrica en estación de monitoreo C: 277,64 (aguas abajo)

Si bien los valores de conductividad eléctrica en cada una de las tres estaciones de monitoreo, registraron en un determinado momento valores inferiores al nivel máximo permitido de 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (según lo establecido en la Tabla 43), se puede inferir que la presencia de amoníaco en el agua en el punto de la estación de monitoreo B, puede haber generado un incremento en la conductividad eléctrica en un porcentaje de 261% respecto al valor registrado en el punto A, y aunque el valor de este parámetro de calidad disminuye en el punto C, también se registra un incremento en la conductividad eléctrica del 225% respecto al valor registrado en la estación de monitoreo A.

Lo anterior puede evidenciar la presencia de una mayor cantidad de sólidos disueltos en el agua de la quebrada en el punto en el cual se localiza la zona de influencia del relleno sanitario y aguas abajo (estaciones B y C respectivamente), si los sólidos disueltos fueran únicamente de origen vegetal, no se presentarían incrementos significativos de conductividad eléctrica. A partir de la información consignada en la tabla 52 se puede realizar una estimación de la cantidad de sólidos disueltos en el agua en unidades de  $\text{mg}/\text{L}$ .

Ecuación 2. Sólidos disueltos totales

$$\text{Sólidos disueltos totales} = \frac{2}{3} \text{Conductividad eléctrica}$$

Donde la cantidad de sólidos disueltos totales se mide en  $\text{mg}/\text{L}$  y la conductividad eléctrica en unidades de  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

A partir de la ecuación 2 se determinan la cantidad de sólidos disueltos en cada uno de los tres puntos donde se desarrolla el monitoreo puntual automático a través de la instrumentación electrónica instalada y las estaciones de monitoreo en campo.

- Sólidos disueltos totales en punto A:

$$\text{Sólidos disueltos totales} = \frac{2}{3} \left( 123,56 \frac{\mu\text{S}}{\text{cm}} \right)$$

$$\text{Sólidos disueltos totales} = 82,373 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

- Sólidos disueltos totales en punto B:

$$\text{Sólidos disueltos totales} = \frac{2}{3} \left( 323,00 \frac{\mu\text{S}}{\text{cm}} \right)$$

$$\text{Sólidos disueltos totales} = 215,333 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

– Sólidos disueltos totales en punto C:

$$\text{Sólidos disueltos totales} = \frac{2}{3} \left( 277,64 \frac{\mu\text{S}}{\text{cm}} \right)$$

$$\text{Sólidos disueltos totales} = 185,093 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

A partir de la información anterior se puede concluir que en el momento específico que se realizó la medición de las variables, la mayor concentración de sólidos disueltos en el agua se encontraba en el punto donde de la estación de monitoreo B, presentando una disminución en el punto C del 67%.

La conductividad eléctrica es una variable que se asocia con el estado del pH en la muestra de agua, ya que el contenido iónico a razón de la concentración de sólidos disueltos (ionizables) incrementa la conductividad eléctrica, por lo tanto, entre mayor sea el valor de la conductividad eléctrica, este aspecto se convierte en un indicador de alcalinidad, parámetro relacionado directamente con la medición de pH en el caso de obtener valores superiores a 11; se considera que incrementos superiores al 50% se deben a su vez al incremento de la cantidad de sólidos disueltos en el agua; de presentarse este tipo de situaciones, las entidades de control deberían dar inicio a procesos de investigación inmediatos, dado el riesgo que suponen este tipo de situaciones.

Nota: los resultados presentados en las figuras 56, 57 y 58, se obtuvieron durante una temporada posterior a un periodo de lluvia, por lo tanto, se asume que este factor pudo incidir de forma directa sobre la variable de la conductividad eléctrica, ya que como se evidencia en el resultado 4, se obtuvieron valores superiores para esta variable ante diferentes condiciones de tiempo, lo cual a su vez arrojó diferentes valores tanto para valores de pH como para valores de concentración de oxígeno disuelto.

Conclusión III:

Los resultados obtenidos para el oxígeno disuelto fueron los siguientes:

- Valor de oxígeno disuelto en estación de monitoreo A: 4,27 mg/L (aguas arriba)
- Valor de oxígeno disuelto en estación de monitoreo B: 4,41 mg/L (dentro de zona de la influencia del relleno sanitario de pirgua)
- Valor de oxígeno disuelto en estación de monitoreo C: 2,91 mg/L (aguas abajo)

Según lo expuesto en la Tabla 44, cuando el recurso hídrico se contamina con compuestos de carbono y nitrógeno, la concentración del oxígeno disuelto en el agua se reduce, por lo tanto, los bajos niveles de esta variable indican que peces y otros organismos acuáticos no tendrán las condiciones adecuadas para existir; por lo tanto, una mayor concentración de oxígeno disuelto indica una mejor calidad del recurso hídrico; por lo general, el recurso hídrico no contaminado, como el presente en ríos y riachuelos de alta montaña, están saturados entre 95% y 100% con oxígeno disuelto.

Al momento de realizar las mediciones en la quebrada “Las Cebollas”, el caudal del recurso hídrico y su velocidad, no era significativos, por lo tanto, este factor pudo ser el origen de los bajos niveles de oxígeno disuelto en las tres estaciones de monitoreo, lo anterior tomando en consideración que la concentración del oxígeno disuelto en el agua se ve afectada por fenómenos físicos y químicos.

La solución tecnológica propuesta permite la generación de alertas a partir del estado de las variables de: pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto; de acuerdo con los parámetros establecidos en el capítulo 3, donde se relaciona los parámetros de calidad permitidos según normatividad para cada una de las tres variables mencionadas; el sistema está en capacidad de generar alertas vía correo electrónico cuando los rangos de las variables se encuentren fuera de los estados permitidos de acuerdo con lo establecido previamente en las tablas 42, 43 y 44, las cuales incluyen la información sobre los estados permitidos de las variables pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto respectivamente, la siguiente tabla resume de forma general los estados que dan lugar a la generación de alertas por parte de sistema.

Tabla 49. Condiciones del sistema para generación de alertas

VARIABLE	ESTADO PERMITIDO	ESTADOS QUE AMERITAN GENERACIÓN DE ALERTA	JUSTIFICACIÓN	MEDIO DE GENERACIÓN DE ALERTAS
pH	Para el consumo humano el valor del pH del agua, debe estar comprendido en el rango entre 6.5 y 9. (Capítulo II, Artículo 4°, Resolución 2115)	pH > 9	Valores superiores a 9, indican presencia de agentes como: amoníaco, jabón, blanqueadores, y limpiadores, entre más se acerque el valor del pH a 14, la sustancia se considera básica (alcalina).  Un valor de pH, del orden de 11, indica la presencia de amoníaco, lo cual es un indicador de posible de contaminación del agua y la presencia de microorganismos patógenos.	Vía correo electrónico y mensaje de texto, desde la plataforma Cayenne myDevices, la cual es utilizada como una plataforma como servicio (PaaS).
		pH < 6.5	Valores de pH inferiores a 6.5, indican que la composición del agua tiende a la acidez.	Vía correo electrónico y mensaje de texto, desde la plataforma Cayenne

VARIABLE	ESTADO PERMITIDO	ESTADOS QUE AMERITAN GENERACIÓN DE ALERTA	JUSTIFICACIÓN	MEDIO DE GENERACIÓN DE ALERTAS
				myDevices, la cual es utilizada como una plataforma como servicio (PaaS).
Conductividad eléctrica	El valor máximo permitido es de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; aclarando que el valor máximo permitido puede ser ajustado según los promedios habituales de la zona y el mapa de riesgo en caso de que este sea determinado por el organismo de control ambiental de la región.	Conductividad eléctrica > 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	<p>Se considera que un incremento superior al 50% se debe a un incremento en la cantidad de sólidos disueltos en el agua y amerita un proceso de investigación inmediato por parte de las autoridades sanitarias y ambientales y la persona prestadora que suministra o distribuye agua para consumo humano.</p> <p>A partir del valor de la conductividad se puede estimar la cantidad de sólidos disueltos en el agua, mediante la siguiente Ecuación:  <math>\text{Conductividad } (\mu\text{S}/\text{cm}) \times \frac{2}{3} = \text{Sólidos disueltos totales (mg/l)}</math></p>	Vía correo electrónico y mensaje de texto, desde la plataforma Cayenne myDevices, la cual es utilizada como una plataforma como servicio (PaaS).
Oxígeno disuelto	Al ser un parámetro que depende tanto de factores físico químicos propios del ambiente, como de la presencia compuestos de carbono y nitrógeno disueltos en el agua, no se encuentra especificación alguna sobre un nivel máximo de concentración de oxígeno disuelto en el agua, por el contrario, una mayor concentración de oxígeno disuelto en el agua, es un indicador de una mayor calidad del recurso hídrico, lo cual lo hace apto para el consumo humano y para la existencia de vida de peces y organismos acuáticos. Se tiene que la mayoría del recurso hídrico no contaminado, como, ríos y riachuelos en alta montaña, están saturados a niveles superiores al 95% con oxígeno disuelto.	Oxígeno disuelto < 50%	Se considera para el sistema, la funcionalidad de generar alertas cuando la concentración de oxígeno disuelto en el agua sea menor al 50%, ya que entre menor sea la cantidad de oxígeno disuelto en el agua, se convierte en un indicador de presencia de agentes contaminantes en el agua.	Vía correo electrónico desde la plataforma Cayenne myDevices, la cual es utilizada como una plataforma como servicio (PaaS).

Fuente: Autor e investigadores.

La siguiente tabla presenta la relación de las alertas disponibles a partir del monitoreo en cada una de las tres estaciones dispuestas para el estudio de caso que compete al presente trabajo, lo anterior en correspondencia con lo expuesto en la tabla 49 sobre las condiciones del sistema para generación de alertas.

Tabla 50. Alertas disponibles dentro del sistema de monitoreo

Alerta	Estación de monitoreo A	Estación de monitoreo B	Estación de monitoreo C
Acidez	Si (correo electrónico y SMS)	Si (correo electrónico y SMS)	Si (correo electrónico y SMS)
Alcalinidad	Si (correo electrónico y SMS)	Si (correo electrónico y SMS)	Si (correo electrónico y SMS)
Nivel bajo de OD (oxígeno disuelto)	Si (correo electrónico y SMS)	Si (correo electrónico y SMS)	Si (correo electrónico y SMS)
Nivel alto de CE (conductividad eléctrica)	Si (correo electrónico y SMS)	Si (correo electrónico y SMS)	Si (correo electrónico y SMS)
Estado de estación (inactiva "offline")	Si (correo electrónico y SMS)	Si (correo electrónico y SMS)	Si (correo electrónico y SMS)

Fuente: Autor e investigadores.

Las siguientes figuras evidencian la configuración de cada una de las alertas a partir de los valores de las mediciones realizadas en cada una de las estaciones de monitoreo A, B y C, y como se mencionó anteriormente, siguiendo los parámetros y condiciones del sistema para generación de alertas especificados en la tabla 48.

Figura 53. Alertas para mediciones de parámetros de calidad del agua

The image displays six alert configuration cards in a vertical list. Each card has a header bar with an 'if' icon, a station name, and a 'then notify...' action. Below the header, the specific alert name is shown, followed by the last run time and the number of times it has run. Each card also features a toggle switch and icons for editing and deleting the alert.

- Alerta acidez en estación C:** if Estación de monitoreo C then notify... (Last ran 1/6/19 9:12 PM, Ran 25 times)
- Alerta alcalinidad en estación C:** if Estación de monitoreo C then notify... (Last ran 1/6/19 8:48 PM, Ran 16 times)
- Alerta nivel alto de CE en estación A:** if Estación de monitoreo A then notify... (Ran 0 times)
- Alerta nivel bajo OD en estación A:** if Estación de monitoreo A then notify... (Ran 0 times)
- Alerta estado de estación A:** if Estación de monitoreo A then notify... (Ran 0 times)

Fuente: Autor e investigadores.

Figura 54. Configuración de alertas en plataforma Cayenne myDevices

The image displays the Cayenne myDevices alert configuration interface. It consists of five panels for different monitoring stations, each with a sensor dropdown, a range slider, and checkboxes for 'Sensor above' and 'Sensor below'. Arrows point from the first three panels to a central 'then notify...' panel, which includes fields for email and phone number, and checkboxes for 'Send Text Message' and 'Send Email'.

- Alerta acidez en estación A:** Sensor: pH, Range: 6.5, Min: 0, Step: 1, Max: 14, Analog.
- Alerta alcalinidad en estación A:** Sensor: pH, Range: 9, Min: 0, Step: 1, Max: 14, Analog.
- Alerta nivel bajo OD en estación B:** Sensor: Oxígeno disuelto, Range: 50, Min: 0, Step: 1, Max: 100, Analog.
- Alerta nivel alto de CE en estación C:** Sensor: Conductividad eléctrica, Range: 1000, Min: 0, Step: 1, Max: 5000, Analog.
- Alerta estado de estación C:** Sensor: Online/Offline, Min: 0, Step: 1, Max: 100, Analog.

**then notify...**

- ☐ Select All
- ☒ Send Text Message (requires mobile phone number)
- ☒ Send Email

Fuente: Autor e investigadores.

A continuación, se presentan las evidencias de las notificaciones recibidas a través de correo electrónico y SMS, cuando se da lugar a la generación de alertas desde la plataforma, de acuerdo con lo estipulado en las tablas 49 y 50, se aclara que la plataforma genera alertas especificando los siguientes parámetros:

- Estación de monitoreo donde se genera la alerta (A, B o C).
- Canal en el cual se genera la notificación, considerando la siguiente equivalencia.

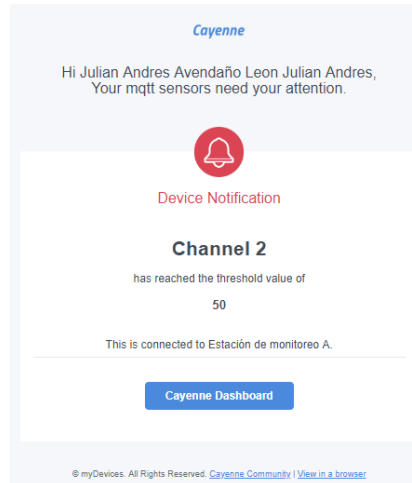
Tabla 51. Canales y sensores equivalentes en plataforma Cayenne

Canal en plataforma	Sensor correspondiente
Channel 1	pH
Channel 2	Oxígeno disuelto
Channel 3	Conductividad eléctrica

Fuente: Autor e investigadores.

- Valor límite o permitido que se encuentra fuera de rango (threshold value).

Figura 55. Ejemplo de notificación sobre concentración de oxígeno disuelto

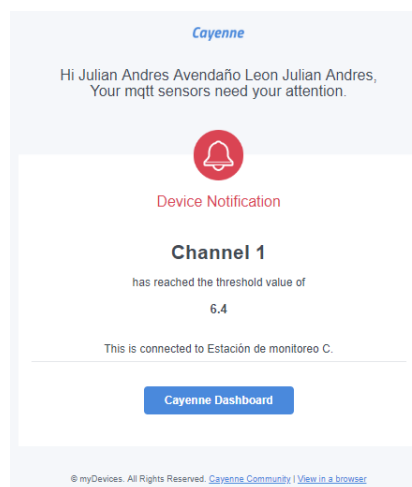


Fuente: Autor e investigadores.

De acuerdo con lo presentado en la figura anterior, la notificación indica al usuario que se ha originado una alerta en la estación de monitoreo A, de forma específica en el canal 2, lo cual hace referencia a que la variable de la concentración del oxígeno disuelto ha alcanzado el valor umbral inferior a la concentración de 50 mg/L.

El siguiente ejemplo, muestra la notificación enviada desde la plataforma como servicio utilizada y que indica al usuario que se ha originado una alerta en la estación de monitoreo C, de forma específica en el canal 1, lo cual hace referencia a la variable pH, que ha alcanzado el valor umbral inferior a 6,4, lo cual indica que el recurso hídrico estaría tendiendo hacia la acidez.

Figura 56. Ejemplo de notificación de valor de pH (acidez)

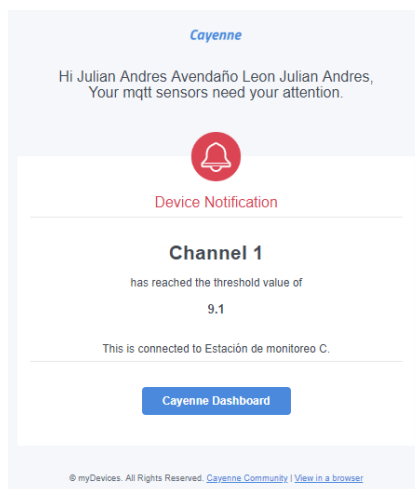


Fuente: Autor e investigadores



De igual forma, la alerta se puede generar en la plataforma en el caso que el umbral máximo permitido para el pH sea superado; el siguiente ejemplo presenta la notificación enviada desde la plataforma como servicio utilizada y que indica al usuario que se ha originado una alerta en la estación de monitoreo C, de forma específica en el canal 1, lo cual hace referencia a la variable pH, que ha alcanzado el valor umbral inferior a 9,1; lo cual indica que el recurso hídrico estaría tendiendo hacia la alcalinidad.

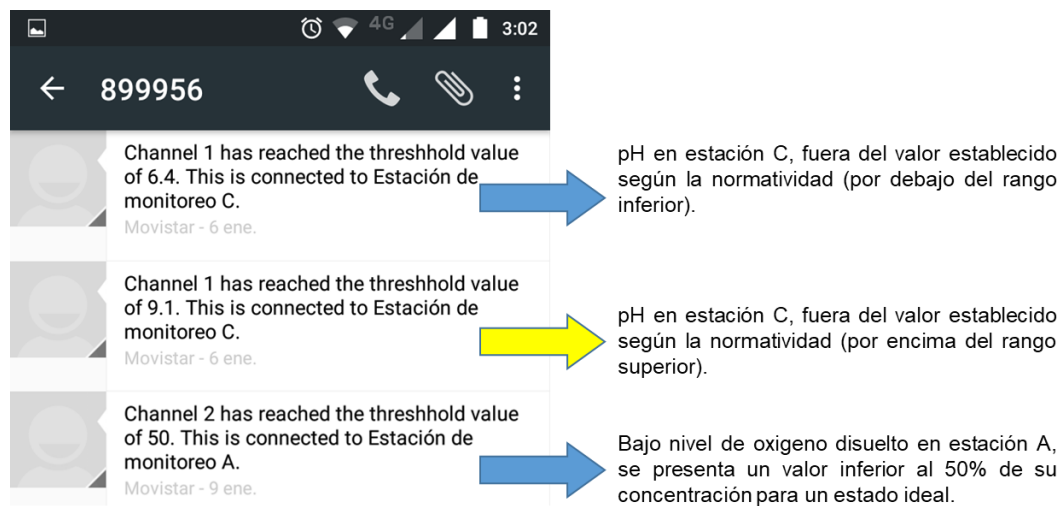
Figura 57. Ejemplo de notificación de valor de pH (alcalinidad)



Fuente: Autor e investigadores.

En la siguiente figura, se presentan las capturas en pantalla de las notificaciones recibidas vía SMS, a partir de las configuraciones para la generación de alertas expuestas anteriormente.

Figura 58. Notificaciones recibidas vía SMS desde plataforma Cayenne



Fuente: Autor e investigadores.

La plataforma como servicio utilizada para el despliegue de las funciones del sistema, permite generar datos estadísticos a partir de la operación del mismo, la plataforma como servicio utilizada para el sistema (Cayenne myDevices), permite el almacenamiento de datos históricos a partir de las mediciones de pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, de cada una de las tres estaciones de monitoreo ubicadas en campo a lo largo del cauce de la quebrada “Las Cebollas” lo que permitirá realizar un seguimiento al comportamiento de las variables, que a su vez son parámetros indicadores de la calidad del recurso de la quebrada.

La aplicación generada desde las plataformas TTN (The Things Network) y Cayenne myDevices, permite al sistema obtener el historial de datos estadísticos ya sea por periodos definidos por el usuario, por hora, día, semana, mes o años; para cada una de las estaciones A, B y C, ubicadas en terreno, a través de estas funciones es posible identificar:

- Valores mínimos de los estados de cada una de las variables.
- Valores máximos de los estados de cada una de las variables.
- Valor de la media de cada una de las variables.
- Valores promedio de cada una de las variables.

A continuación, se presenta la disposición de la tabla de datos emitida por cada una de las estaciones de monitoreo, a partir del desarrollo de la actividad de muestreo puntual automático.

Figura 59. Registro de datos en plataforma Cayenne myDevices

Overview		Data		Estación A				
				Network: The Things Network				
Live		m h d w 1mo		Custom Query				
				Download				
Timestamp	Devic...	Channel	Sensor Name	Sensor ID	Data T...	Unit	Values	
2019-01-04 12:34:54	Estación A	1	pH	e288f1b0-be8a-11e8-9d...		null	5.69	
2019-01-04 12:34:41	Estación A	1	pH	e288f1b0-be8a-11e8-9d...		null	5.7	
2019-01-04 12:34:29	Estación A	1	pH	e288f1b0-be8a-11e8-9d...		null	5.69	
2019-01-04 12:34:54	Estación A	2	Oxígeno disuelto	e29351f0-be8a-11e8-9...		null	8.99	
2019-01-04 12:34:41	Estación A	2	Oxígeno disuelto	e29351f0-be8a-11e8-9...		null	8.99	
2019-01-04 12:34:29	Estación A	2	Oxígeno disuelto	e29351f0-be8a-11e8-9...		null	9.03	
2019-01-04 12:34:54	Estación A	3	Conductividad eléctrica	e2afdaa0-be8a-11e8-b1...		null	0	
2019-01-04 12:34:41	Estación A	3	Conductividad eléctrica	e2afdaa0-be8a-11e8-b1...		null	0	
2019-01-04 12:34:29	Estación A	3	Conductividad eléctrica	e2afdaa0-be8a-11e8-b1...		null	0	
2019-01-04 12:34:54	Estación A	4	Estado de la batería	e2ccd880-be8a-11e8-9d...		null	3.79	
2019-01-04 12:34:41	Estación A	4	Estado de la batería	e2ccd880-be8a-11e8-9d...		null	4.09	
2019-01-04 12:34:29	Estación A	4	Estado de la batería	e2ccd880-be8a-11e8-9d...		null	4.09	

Fuente: Autor e investigadores.

La base de datos generada en la plataforma Cayenne myDevices, incluye los siguientes campos de información, relacionados con el monitoreo de los parámetros de calidad del agua, para cada una de las tres estaciones de monitoreo ubicadas en campo.

- Timestamp: fecha y hora de la adquisición del dato.
- Device Name: nombre de la estación de monitoreo.
- Channel: canal a través del cual se transmite los datos de cada sensor.
- Sensor Name: nombre del sensor (pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto).
- Sensor ID: identificación del sensor (DevEUI en Cayenne myDevices y TTN).
- Data Type: float.
- Unit: unidad de medida según cada sensor.
- Values: valor de la medición.

Para la aplicación requerida para el estudio de caso, únicamente son relevantes los campos de información correspondientes: timestamp, device name, channel y values, ya que a partir de estos las funciones de la plataforma permiten generar gráficos en tiempo real respecto al comportamiento de cada una de las variables en cada una de las estaciones de monitoreo, lo cual entrega al operador del relleno sanitario o a la autoridad ambiental, la posibilidad no solo de conocer en tiempo real el comportamiento de los parámetros de calidad del recurso hídrico de la quebrada “Las Cebollas”, sino que también les podría permitir la planeación de actividades de control y la identificación de posibles focos de contaminación sobre el recurso hídrico de dicha quebrada, a partir de esta información se pueden obtener datos estadísticos como lo que se presentan en el siguiente apartado, correspondiente al resultado 4, producto del trabajo desarrollado.

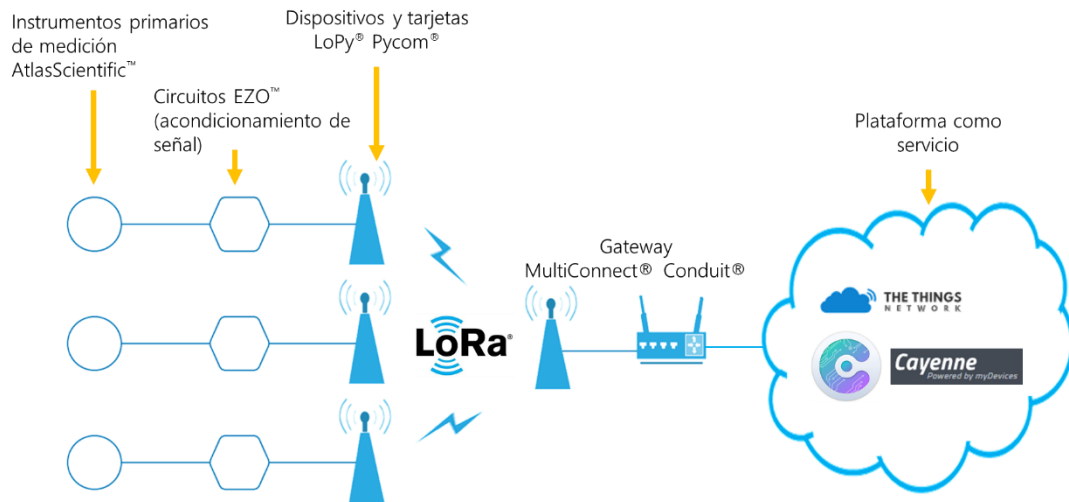
---

### Resultado 3:

---

En correspondencia con los objetivos trazados para el desarrollo del presente trabajo, se entrega como resultado la implementación de una solución tecnológica con alcance de prototipo funcional, configurado bajo el esquema del paradigma de Internet de las Cosas para el sistema diseñado, las evidencias de este desarrollo se encuentran consignadas en los capítulos 3 y 4 del presente documento, las siguientes figuras presentan el resumen de la estructura general del sistema bajo el esquema del Internet de las Cosas y que se detalló con mayor profundidad en los capítulos mencionados.

Figura 60. Modelo de solución desplegada según el esquema de IoT



Fuente: Autor e investigadores.

Como se expuso en capítulos anteriores, la solución propuesta cumple con los parámetros tecnológicos correspondientes al concepto del IoT, ya que las plataformas de hardware para comunicación incorporadas (microcontroladores LoPy®), se encuentran interconectados de manera digital a través de LoRa® y a través de las plataformas TTN (The Things Network) y Cayenne myDevices a Internet, lo anterior permitiendo el seguimiento en tiempo real de comportamiento de los parámetros de calidad del recurso hídrico de la quebrada “Las Cebollas”, en cada una de las tres estaciones de monitoreo propuestas. A través de la solución tecnológica propuesta a escala de prototipo funcional, se evidencia la estructura de su construcción bajo los parámetros del Internet de las Cosas.

---

#### Resultado 4:

---

Dentro de los objetivos propuestos para el desarrollo del trabajo, se planteó el desarrollar pruebas de desempeño de la solución tecnológica, lo cual se realizó a partir de la puesta en funcionamiento de cada una de las estaciones de monitoreo; lo anterior implicó la instalación de las tres estaciones de monitoreo en las ubicaciones geográficas presentadas en el capítulo 7, las cuales se incluyen a continuación.

- Punto “A”: ubicada, aguas arriba: coordenadas 5.5770974, -73.31496, elevación de 2721 metros, esta es una ubicación geográfica previa a la influencia del Relleno Sanitario de Pírgua sobre la quebrada “Las Cebollas”.
- Punto “B”: ubicada, en las coordenadas 5.5791125, -73.31645, elevación de 2661 metros, esta es una ubicación geográfica dentro de la zona de influencia del Relleno Sanitario de Pírgua sobre la quebrada “Las Cebollas”.

– Punto “C”: ubicada, en las coordenadas 5.579799, -73.318565, elevación de 2660 metros, esta es una ubicación geográfica fuera de la zona de influencia (inmediata) del Relleno Sanitario de Pirgua, respecto a la quebrada “Las Cebollas”.

Como parte del despliegue y puesta en funcionamiento se realizó un total de seis pruebas, tomando el muestreo de las tres variables que competen al estudio de caso, logrando así establecer los valores promedio, máximo y mínimo en cada oportunidad, los resultados obtenidos se incluyen a continuación.

– Prueba 1: esta prueba se realizó en el mes de julio de 2018, se destaca que se presentó tiempo seco durante el periodo en que se realizaron las mediciones.

Tabla 52. Datos de estaciones de monitoreo “Prueba 1”

Variable	Valor Promedio			Valor Mínimo			Valor Máximo		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
pH	5,26	10,34	5,46	5,09	10,11	5,23	5,45	10,56	5,68
Oxígeno disuelto (mg/L)	3,87	3,12	3,50	3,66	2,87	3,12	4,07	3,43	3,82
Conductividad eléctrica (µS/cm)	188,25	905,22	928,29	183,77	888,68	903,52	192,31	923,47	952,44
A: estación de monitoreo A      B: estación de monitoreo B      C: estación de monitoreo C									

Fuente: Autor e investigadores.

– Prueba 2: se realizó en el mes de agosto de 2018, durante algunos periodos de la medición, se presentaron algunas precipitaciones y lloviznas cortas.

Tabla 53. Datos de estaciones de monitoreo “Prueba 2”

Variable	Valor Promedio			Valor Mínimo			Valor Máximo		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
pH	5,72	8,88	5,94	4,98	8,25	5,57	6,99	9,41	6,34
Oxígeno disuelto (mg/L)	4,40	5,71	7,04	2,87	5,52	6,85	7,22	6,12	7,80
Conductividad eléctrica (µS/cm)	124,32	782,14	816,61	100,23	713,27	778,29	149,23	833,76	855,21
A: estación de monitoreo A      B: estación de monitoreo B      C: estación de monitoreo C									

Fuente: Autor e investigadores.

– Prueba 3: realizada en el mes septiembre de 2018, con algunas lloviznas esporádicas.

Tabla 54. Datos de estaciones de monitoreo “Prueba 3”

Variable	Valor Promedio			Valor Mínimo			Valor Máximo		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
pH	5,66	5,45	5,20	5,26	5,05	4,72	6,01	5,96	5,71
Oxígeno disuelto (mg/L)	5,50	3,33	5,81	5,02	0,91	5,30	6,00	4,99	6,27
Conductividad eléctrica (µS/cm)	119,88	644,35	728,95	110,06	633,01	684,75	129,54	656,90	767,19
A: estación de monitoreo A      B: estación de monitoreo B      C: estación de monitoreo C									

Fuente: Autor e investigadores.

– Prueba 4: realizada en el mes octubre de 2018.

Tabla 55. Datos de estaciones de monitoreo “Prueba 4”

Variable	Valor Promedio			Valor Mínimo			Valor Máximo		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
pH	6,20	5,13	4,71	5,73	4,64	4,35	6,66	5,96	5,00
Oxígeno disuelto (mg/L)	5,89	4,91	2,80	4,87	4,35	2,44	7,31	5,94	3,51
Conductividad eléctrica (µS/cm)	203,11	830,74	952,24	184,48	808,65	928,42	211,46	858,63	968,81
A: estación de monitoreo A      B: estación de monitoreo B      C: estación de monitoreo C									

Fuente: Autor e investigadores.

– Prueba 5: realizada el día 6 de enero de 2019.

Datos de estaciones de monitoreo “Prueba 5”

Variable	Valor Promedio			Valor Mínimo			Valor Máximo		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
pH	9,16	10,25	6,21	8,57	9,83	5,67	9,78	10,67	6,67
Oxígeno disuelto (mg/L)	5,95	4,69	4,50	5,86	4,32	4,22	6,03	5,08	4,78
Conductividad eléctrica (µS/cm)	191,46	1128,35	1189,06	180,75	979,34	964,36	202,01	1305,57	1409,28
A: estación de monitoreo A      B: estación de monitoreo B      C: estación de monitoreo C									

Fuente: Autor e investigadores.

---

#### Resultado 5:

---

Registro y caracterización de la Quebrada “Las Cebollas”, en la zona circundante a la ubicación del relleno sanitario de Pírgua, este resultado se detalla de forma específica el capítulo 3 (solución tecnológica), numeral 3.2. correspondiente a la caracterización del estudio de caso.

El trabajo desarrollado, permitió realizar una propuesta de protocolo de muestreo, tomando en consideración la normatividad ambiental establecida en Colombia, en relación a la vigilancia y control del recurso hídrico en fuentes cercanas a rellenos sanitarios, lo anterior se sustenta con lo expuesto en el capítulo 3, de forma específica en el numeral 3.3. correspondiente al protocolo de muestreo.

Prototipo funcional para el monitoreo de las variables: pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, en tres puntos de control a lo largo del cauce de la quebrada “Las Cebollas” tomando como referencia la ubicación y la zona de influencia del relleno sanitario de Pírgua sobre esta quebrada, lo anterior se evidencia en el capítulo 3, y en lo expuesto en los resultados 2, 3 y 4 del este capítulo.

---

#### Resultado 6:

---

El desarrollo de trabajo propuesto para lograr establecer el sistema IoT para supervisar la calidad en caudales superficiales, a partir de la normatividad ambiental, tuvo desde su inicio un componente de trabajo interdisciplinar y dentro de este se contó con la participación activa de estudiantes del pregrado del Grupo de Investigación TELEMATICS (Internet de las Cosas), en el caso específico del estudiante de

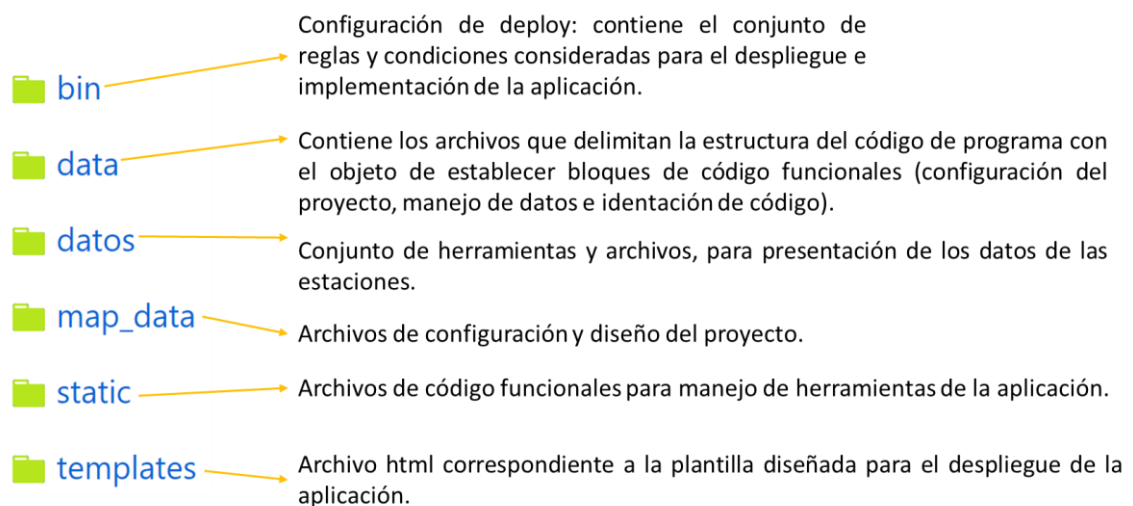
Ingeniería de Sistemas y Computación Diego Alexander Sosa Suárez, quien aportó el desarrollo la interfaz para el despliegue y visualización de la información proveniente de cada una de las estaciones de monitoreo ubicadas en terreno.

La interfaz desarrollada permite a los usuarios finales (para el estudio de caso seleccionado, son el operador del relleno Sanitario de Pírgua- ServiTunja y la autoridad ambiental del departamento de Boyacá- Corpoboyacá), tener acceso en tiempo real a la siguiente información:

- Datos pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, para cada una de las tres estaciones de monitoreo.
- Gráfica de datos históricos del comportamiento de la variable pH en cada una de las estaciones.
- Gráfica de datos históricos del comportamiento de la variable conductividad eléctrica en cada una de las estaciones.
- Gráfica de datos históricos del comportamiento de la variable oxígeno disuelto en cada una de las estaciones.
- Valores promedio de cada una de las variables monitoreadas según la fecha en que se realizó el monitoreo.
- Mapa con ubicación en campo de las tres estaciones de monitoreo.

Las funciones mencionadas fueron incorporadas dentro de la solución tecnológica propuesta, a través del desarrollo de funciones por medio de API's, que permiten enlazar la información proveniente de la plataforma TTN y su integración a través de Node-RED, hacia la aplicación de usuario; los archivos y carpetas que componen la interfaz para el despliegue y visualización de la información del sistema son:

Figura 61. Carpetas de configuración de la interfaz del proyecto



Fuente: Investigadores.

Adicionalmente, el diseño de la aplicación requirió de la configuración de los archivos que cumple las funciones especificadas para cada caso:

- Gitignore: configuración del diseño de la interfaz.
- README.md: configuración del tema de la aplicación.
- \_config.yml: configuración del tema de la aplicación.
- data\_stationpoint.sql: archivo para actualización de datos.
- dataset.json: actualización y lectura de datos para presentación.
- manage.py: configuración del proyecto.
- requirements.txt: especificaciones de conexión con el servidor.

Las siguientes figuras, presentan la vista de usuario desplegada a través de la interfaz desarrollada.

Figura 62. Vista de inicio de la interfaz de monitoreo desarrollada



Fuente: Investigadores.

La figura 63 presenta la vista de despliegue de la información adquirida a través de cada una de las estaciones de monitoreo, en lo referente a los valores de cada una de las variables seleccionadas para el desarrollo del prototipo de selección tecnológica.



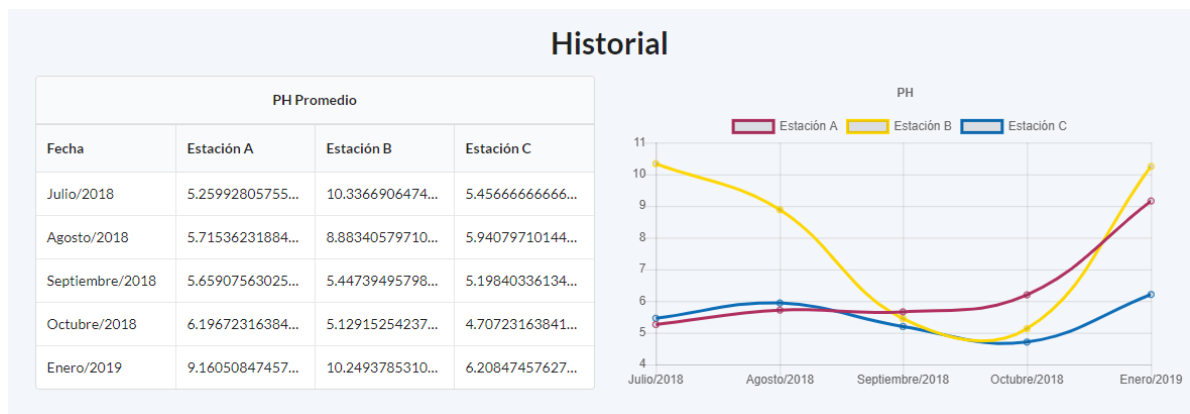
Figura 63. Ventana de despliegue de información en tiempo real

Datos de Estación		
Estación A		
Variable	Val	
PH	6	
Oxígeno Disuelto	6	
Conductividad Eléctrica	8	
Estado de batería	1	
Estación B		
Variable	Val	
PH	5	
Oxígeno Disuelto	6	
Conductividad Eléctrica	8	
Estado de batería	7	
Estación C		
Variable	Val	
PH	5	
Oxígeno Disuelto	6	
Conductividad Eléctrica	8	
Estado de batería	2	

Fuente: Investigadores.

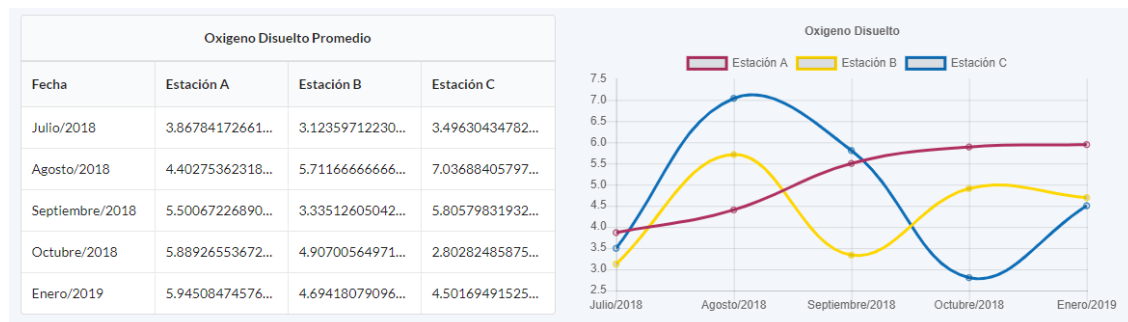
Como se mencionó, la interfaz desarrollada incluyó funciones que permiten al usuario final tener acceso a gráficas y tablas de datos a partir de las cuales se puede conocer el comportamiento de cada una de las variables seleccionadas para el despliegue de las actividades de monitoreo, ofreciendo así la posibilidad de conocer el valor promedio de cada una de las variables y la gráfica del comportamiento de las mismas a través de los periodos en los cuales se desarrolló el monitoreo; evidencia de lo anterior, se incuyen las siguientes imágenes que permiten observar la información a partir de la cual el operado del relleno sanitario y la autoridad ambiental, podrán tomar decisiones y emprender planes de acuerdo a su competencia.

Figura 64. Comportamiento y valores promedio de pH



Fuente: Investigadores.

Figura 65. Comportamiento y valores promedio de oxígeno disuelto



Fuente: Investigadores.

Figura 66. Comportamiento y valores promedio de conductividad eléctrica



Fuente: Investigadores.

## Resultado 7:

Socialización del proyecto a través de las actividades relacionadas en la siguiente tabla.

Tabla 56. Actividades de socialización de resultados

Producto	Evento	Institucion	Soporte
Poster	XXII JORNADA DE LA INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN "La investigación de la UPTC, hacia los retos de región y 'país"	Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia	Anexo 4 Anexo 5
Ponencia	VI Seminario Internacional y VII Nacional de Geomática, Medio Ambiente e Hidráulica - SIGMAH 2018.	Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia	Anexo 6

Producto	Evento	Institucion	Soporte
Sustentación	Sistema IoT para Supervisar la Calidad en Caudales Superficiales, a partir de la Normatividad Ambiental	Corporación Autónoma Regional de Boyacá "Corpoboyacá" y Operador del Relleno Sanitario de Pírgua "ServiTunja S.A. E.S.P."	Anexo 7

Fuente: Autor.

## 5. CONCLUSIONES

El desarrollo y despliegue de la solución tecnológica permitió realizar el monitoreo de pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto en el agua en los tres puntos de control establecidos; según los resultados obtenidos, se puede concluir que existe presencia de agentes contaminantes en el recurso hídrico de la quebrada “Las Cebollas” en el punto de monitoreo correspondiente a la estación B, lo anterior considerando que se encontraron valores de pH promedio de 5.59, lo cual se encuentra fuera del rango permitido para esta variable según la normatividad vigente, de igual forma se encontraron valores de conductividad eléctrica entre 526.67  $\mu\text{S/cm}$  y 789.55  $\mu\text{S/cm}$ , lo que permite inferir que puede existir presencia de una mayor cantidad de material orgánico disuelto en el agua; estos valores se adquirieron durante las pruebas realizadas el día 9 de junio de 2018, por lo tanto se sugiere realizar un muestreo automático y puntual durante un periodo mayor, y a futuro se sugiere adoptar un esquema de monitoreo compuesto, que permita al operador del relleno sanitario decidir si es necesario implementar protocolos de corrección y mitigación de posibles impactos ambientales negativos.

Según la información reportada desde las estaciones de monitoreo de los puntos de control A y C, se puede concluir que a la fecha no existe evidencia de contaminación debido a vertimientos de líquidos y/ o residuos sólidos y orgánicos por parte de los habitantes de la zona, o por efectos de la operación del relleno sanitario de Pirgua.

Si bien, según los parámetros establecidos en el decreto 838 de 2005 sobre las frecuencias de monitoreo de pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica (semestrales y anuales), permitirían conocer y caracterizar los posibles niveles de contaminación generados por la operación del relleno sanitario de Pirgua u otros agentes presentes en la zona circundante a la quebrada “Las Cebollas”, los valores de estas tres variables pueden sufrir cambios repentinos, por lo tanto, un muestreo manual, según las frecuencias de muestreo indicadas por el decreto no son suficientes para evaluar los parámetros de calidad del recurso hídrico y tampoco sería factible identificar con mayor precisión las posibles fuentes de dicha contaminación; así pues, el muestreo automático y puntual en cada uno de los tres emplazamientos indicados supone una ventaja frente al muestreo puntual y manual; y aunque se adoptó el muestreo automático, la autoridad ambiental podría implementar un programa de muestreo mixto integrado que tome en cuenta los dos tipos de muestreo: manual y automático, con el fin de realizar la totalidad de procedimientos indicados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales en la Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas.

Según los resultados del trabajo, es posible inferir que la hipótesis planteada como: “Un sistema tecnológico basado en el paradigma IoT contribuirá a incrementar los

niveles de eficiencia en cuanto al monitoreo, control y reporte de las variables de inspección sobre el caudal de la quebrada “Las Cebollas”, en virtud de la normatividad vigente”, se trató de manera positiva, mediante el desarrollo de la solución tecnológica propuesta como herramienta funcional, que podría ser incorporada dentro de los esquemas y protocolos de trabajo tanto de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá “Corpoboyacá”; como por parte operador del Relleno Sanitario de Pírgua “ServiTunja S.A. E.S.P.”, como herramienta de apoyo para la toma de decisiones y posterior despliegue de acciones que junto con procedimientos de muestreo mixto, permitan la identificación de los agentes o fuentes de contaminación que inciden de forma directa en la calidad del recurso hídrico de la quebrada seleccionada para el estudio de caso.

El procedimiento investigativo permite concluir que se dio respuesta a la pregunta de investigación formulada como: ¿De qué manera una solución tecnológica basada en el paradigma de Internet de las Cosas puede contribuir a la inspección de la calidad de agua de fuentes hídricas superficiales?, bajo las siguientes consideraciones:

Se desarrollo una solución tecnológica bajo el paradigma del Internet de las Cosas (IoT), utilizando instrumentación electrónica a partir de sensores y circuitos de acondicionamiento de señal certificados, se incorporó un esquema Cloud Computing para la persistencia y procesamiento de datos, se tomaron en cuenta los parámetros normativos para la generación de alertas tempranas, la solución tecnológica propuesta permitió el despliegue de los datos y generación de gráficos, según los valores de las variables monitoreadas en cada una de las estaciones ubicadas en campo, de las cuales se cuenta con la información georreferenciada de la ubicación de cada una de ellas, permite tanto a la autoridad ambiental, como al operador del relleno sanitario, contar con la informacion de manera inmedita, lo cual se constituye en un factor determinante para que la Autoridad Ambiental-Corpoboyacá y el operador del relleno sanitario de Pírgua -ServiTunja, puedan encontrar en la solución tecnológica propuesta una herramienta para el desarrollo de actividades de muestreo automatico puntual como mecanismo de supervisión en tiempo real, de las variables de: pH, conductividad electria y oxígeno disuelto, y a su vez emprendan acciones de control según el grado de competencia que les asiste.

Si bien es cierto que el paradigma de Internet de las Cosas se ha posicionado en los terrenos tecnológico, científico y cotidiano para la sociedad, y que han surgido iniciativas de estandarización como la ITU Y.4000/Y.2060 y de formalización del ecosistema, de momento se aprecian tan solo como recomendaciones, de forma que el gran peso de la implementación de soluciones sustentadas en IoT corre por cuenta de los desarrollos propietarios, las iniciativas de comunidades y en últimas de las denominadas “buenas prácticas”. Ante esta situación, en esta investigación fue suplida la implementación de la instrumentación tecnológica, basada en la

integración de sensores debidamente soportados y certificados por sus fabricantes, su integración en placa se realizó con las mejores prácticas a nivel electrónico, la lógica a nivel de controladoras se desplegó desde herramientas de desarrollo aceptadas por la comunidad IoT, la comunicación se diseñó en consonancia con los modelos ofrecidos por los fabricantes, el desarrollo del lado cloud se hizo con plataformas reconocidas que acatan los parámetros de integridad, confiabilidad y disponibilidad, y finalmente el despliegue se realizó bajo las premisas del desarrollo web tradicional. De esta manera se ha orquestado la solución tecnológica para un proceso de automatización extremo a extremo y soporte a la toma de decisiones para las organizaciones citadas, correspondiendo con las pretensiones proyectadas desde una primera instancia para este proceso investigativo.

Dentro de los parámetros que miden la calidad del recurso hídrico se consideraron los niveles de: pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, DQO y los niveles de concentración de metales pesados, amoníaco, nitritos y nitratos, y tal como se sustentó en el proceso de selección de variables y dispositivos, debido a factores técnicos y económicos, únicamente se tomaron en cuenta las variables de pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, ya que para dichas variables existen los instrumentos de medición adecuados para realizar la medición in situ; se aconseja que para la estimación de la concentración de metales pesados, amoníaco, nitritos y nitratos, se acuda al uso de instrumentos, equipos y procedimientos de análisis in vitro, lo anterior justifica la necesidad de adoptar un protocolo de muestreo mixto integrado (muestreo manual y automático) que permita evaluar la totalidad de los parámetros de calidad del recurso hídrico de la quebrada “Las Cebollas”.

El prototipo desarrollado de ser considerado por parte de la autoridad ambiental y del operador de relleno sanitario de Pírgua como una herramienta de trabajo, les permitiría adoptar medidas de control a partir del monitoreo de las variables ya mencionadas, teniendo en cuenta que dentro de las funciones que brinda la aplicación generada mediante la integración de las plataformas TTN y Cayenne myDevices, se tiene la posibilidad de observar los registros de los valores de cada variable de cada una de las estaciones en tiempo real. Lo anterior supone una oportunidad para el desarrollo de procesos de vinculación del sector académico-investigativo con organizaciones regionales en busca del mejoramiento de las condiciones ambientales. Este tipo de empoderamientos tecnológicos por parte de entidades a nivel regional evidencia la proyección social desde los programas académicos de la UPTC y su pertinencia y vigencia dentro del contexto del departamento de Boyacá.

## 6. FUENTES DE INFORMACIÓN

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 838 (23, marzo, 2005). Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2005. no. 45862. p. 1-15.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 1274 (30, junio, 2006). Por la cual se acogen los términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental para la construcción y operación de rellenos sanitarios y se adoptan otras determinaciones. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2006. no. 46376. p. 1-26.

MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. REPÚBLICA DE COLOMBIA. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. RAS. Bogotá, D.C.: El Ministerio, 2017. 182 p.

COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Resolución 0330 (8, junio, 2017). Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2017. no. 50267. p. 1-182.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 1274 (30, junio, 2006). Por la cual se acogen los términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental para la construcción y operación de rellenos sanitarios y se adoptan otras determinaciones. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2006. no. 46376. p. 1-26.

UNIÓN EUROPEA. PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO. Directiva 2011/65/UE (8, junio, 2011). Sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos. Diario Oficial de la Unión Europea. Estrasburgo, 2011. no. L 174. p. 1-116.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Parameters of water quality. Interpretations and Standards. Wexford.: Environmental Protection Agency, 2001. ISBN 1-84096-015-3.

KENNETH M, Vigil. The water environment. En: Clean water: an introduction to water quality and water pollution control. 2 ed. Corvallis.: Oregon State University Press, 2003. p. 7-22.

KENNETH M, Vigil. Clean water: an introduction to water quality and water pollution control. 2 ed. Corvallis.: Oregon State University Press, 2003. ISBN 0-87071-498-8.

VOUDOURIS, Kostas y VOUTSA, Dimitra. Water quality monitoring and assessment. Rijeka.: InTech. 2012. ISBN 978-953-51-0486-5.

SAMBORSKA, Katarzyna; ULANCZYK, Rafal y KORSZUN, Katarzyna. Monitoring and modelling of water quality. En: VOUDOURIS, Kostas y VOUTSA, Dimitra. Water quality monitoring and assessment. Rijeka.: InTech. 2012. p. 189-226.

MULEI KITHIA, Shadrack. Water quality degradation trends in Kenya over the last decade. En: VOUDOURIS, Kostas y VOUTSA, Dimitra. Water quality monitoring and assessment. Rijeka.: InTech. 2012. p. 509-526.

POSTOLACHE, Octavian; SILVA GIRÃO, Pedro y DIAS PEREIRA, José Miguel. Water quality monitoring and associated distributed measurement systems: an overview. En: VOUDOURIS, Kostas y VOUTSA, Dimitra. Water quality monitoring and assessment. Rijeka.: InTech. 2012. p. 25-66.

POSTOLACHE, Octavian; SILVA GIRÃO, Pedro y DIAS PEREIRA, José Miguel. Water quality monitoring and associated distributed measurement systems: an overview. En: VOUDOURIS, Kostas y VOUTSA, Dimitra. Water quality monitoring and assessment. Rijeka.: InTech. 2012. p. 37-38.

POSTOLACHE, Octavian; SILVA GIRÃO, Pedro y DIAS PEREIRA, José Miguel. Water quality monitoring and associated distributed measurement systems: an overview. En: VOUDOURIS, Kostas y VOUTSA, Dimitra. Water quality monitoring and assessment. Rijeka.: InTech. 2012. p. 40-42.

COLOMBIA. MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. Decreto 1575 (09, mayo, 2007). Por el cual se establece el sistema para la protección y control de la calidad del agua para consumo humano. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2007. no. 46623. p. 1-13.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL Y MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. Resolución 2115 (22, junio, 2007). Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2007. no. 46679. p. 1-26.

VOUDOURIS, Kostas y VOUTSA, Dimitra. Water quality monitoring and assessment. Rijeka.: InTech. 2012.

MORRIS. Alan S. Measurement and instrumentation principles. 3 ed. Woburn.: Butterworth-Heinemann. 2001.

MORRIS. Alan S. Summary of other measurements. En: Measurement and instrumentation principles. 3 ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2001. p. 437-439.

WEBSTER, John G. The measurement, instrumentation and sensors Handbook. Boca Raton.: CRC Press LLC and IEEE Prees. 1999. p. 1-2588. ISBN 0-8493-2145-X.

WEBSTER, John G. Electromagnetic variables measurement. En: The measurement, instrumentation and sensors Handbook. Boca Raton: CRC Press LLC and IEEE Prees. 1999. p. 1332-1335.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. The principal parameters of water quality. En: Parameters of water quality. Interpretations and Standards. Wexford.: Environmental Protection Agency, 2001. P. 79-81.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 3100 (30, octubre, 2003). Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2003. no. 45357. p. 1-13.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (Colombia). Selección del sitio de muestreo. En: Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. Bogotá. IDEAM. 2004. p. 9-10.



CISCO. Internet of Things (IoT). Cisco IoT accelerates digital transformation, delivering insight and action from your data [online]. [citado 2018 07 14]. Disponible desde Internet: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/internet-of-things/overview.html#~stickynav=6>>.

IEEE. The Democratization of Innovation for the Internet of Things. IEEE Spectrum. [online]. [citado 2018 07 14]. Disponible desde Internet: <<https://spectrum.ieee.org/computing/networks/the-democratization-of-innovation-for-the-internet-of-things>>.

IEEE. Jeremy Rifkin on the Internet of Things and the Next Industrial Revolution. IEEE Spectrum. [online]. [citado 2018 07 14]. Disponible desde Internet: <<https://spectrum.ieee.org/tech-talk/telecom/internet/jeremy-rifkin-on-the-internet-of-things-and-the-next-industrial-revolution>>.

D'ESTE, Claire, et al. A Low-Cost, Long-Life, Drifting Sensor for Environmental Monitoring of Rivers and Estuaries. En: IEEE Xplore: 2012 Oceans – Yeosu. Mayo, 2012; p. 1-6. ISBN 978-1-4577-2091-8. DOI: 10.1109/OCEANS-Yeosu.2012.6263393.

WANG, Jing y LIU, Tingting. Application of wireless sensor network in Yangtze River Basin water environment monitoring. En: IEEE Xplore: The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC). Mayo, 2015; p. 1-5. ISBN 978-1-4799-7017-9. DOI: 10.1109/CCDC.2015.7161882.

UNNIKRISHNA MENON, K.A, DIVYA, P y MANEESHA V, Ramesh. Wireless Sensor Network for River Water Quality Monitoring in India. En: IEEE Xplore: 2012 Third International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT'12). Julio, 2012; p. 1-7. DOI: 10.1109/ICCCNT.2012.6512437.

PAZMIÑO-RODRÍGUEZ, Julio César; ZAMBRANO-GANCHOZO, Gabriela Lisseth y COELLO-BURGOS, Hevert Aarón. Modelización de la calidad del agua del estero aguas Claras, cantón Quevedo, Ecuador. En: DYNA, Volumen 85, Número 204, p. 204-214, 2018. ISSN electrónico 2346-2183. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.65847>.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION®; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION® y WATER ENVIRONMENT FEDERATION® (Estados Unidos). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22 ed. Washington DC.: American Public Health Association. 2012. 1496 p. ISBN 9780875530130.

YIHENG, Chen y DAWEI, Han. Water quality monitoring in smart city: A pilot Project. En: Automation in Construction, Volumen 85, p. 307-316. ISSN 0926-5805. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.008>.

PULE, Mompoloki, YAHYA, Abid y CHUMA, Joseph. Wireless sensor networks: A survey on monitoring water quality. En: Journal of Applied Research and Technology, Volume 15, Issue 6, p. 562-570. ISSN 1665-6423. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jart.2017.07.004>Get rights and content.

STOTT, Leda y RAMIL, Xosé. Metodología para el desarrollo de estudios de caso. Madrid.: Centro de Innovación Tecnológica para el Desarrollo Humano Universidad Politécnica de Madrid, 2014. 35 p.

LoRa® ALLIANCE TECHNICAL MARKETING WORKGROUP. LoRaWAN™ What is it?: A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™. San Ramon, CA.: LoRa® Alliance, 2015. 20 p.



## 7. ANEXOS

## Anexo 1. Protocolo de calibración para el circuito pH EZO™

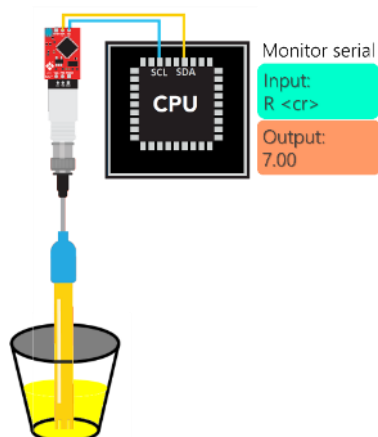
Por especificación del fabricante, el primer punto de calibración debe realizarse utilizando la sustancia de calibración pH 7.00

Primer punto de calibración: pH 7.00

-Paso 1: se procedió a retirar de la sonda el recipiente almacenamiento y a enjuagar con agua la sonda de medición.

- Paso 2: luego de disponer de la solución de calibración pH 7.00 en un recipiente, se sumergió la sonda de medición dentro de dicha solución y se esperó un tiempo de dos minutos antes de realizar la primera medición, este tiempo es requerido para estabilizar la lectura.

Figura A. Circuito implementado y procedimiento de calibración pH 7.00



Fuente: Autor e investigadores.

- Paso 3: por línea de comandos en el monitor serial del microcontrolador, se configuró el valor de compensación de temperatura, teniendo en cuenta la temperatura ambiente de 15.4°C, al momento de realizar el procedimiento, también se ingresó el comando para calibración en el punto medio del rango de valores de pH (7.00).

Tabla A. Comandos para configuración y calibración pH 7.00

Comando	Resultado
T,15.4°C <cr>	Configuración en 15.4°C, como punto de compensación de temperatura.
Cal,mid,7.00 <cr>	Dispositivo calibrado en el punto medio de calibración (sustancia pH 7.00)

Fuente: Autor e investigadores.

- Paso 4: en esta etapa del procedimiento de calibración, se realiza la toma de mediciones, luego de configurar el dispositivo en el punto de calibración mediante el código ingresado por línea de comandos en el monitor serial del microcontrolador,

y con la sonda de medición dentro de la solución patrón de pH 7.00, se tomaron un total de 60 muestras, con un periodo de muestreo de 1 lectura por minuto, a partir de lo anterior se determinaron de forma estadística las siguientes características estáticas del instrumento:

Tabla B. Características estáticas del instrumento para calibración pH 7.00

Característica estática	Valor (pH)
Valor promedio	7,0305
Valor máximo	7,036
Valor mínimo	7,024
Rango promedio del error	0,00875
Error basado en el valor más alejado	0,036
Exactitud basada en la desviación estándar $\pm d$	0,0305

Fuente: Autor e investigadores

Segundo punto de calibración: pH 4.00

– Paso 1: al igual que el caso de calibración en el punto medio, se enjuagó con agua la sonda de medición, antes de realizar el procedimiento de calibración en el punto 4.00.

– Paso 2: luego de disponer de la solución de calibración pH 4.00 en un recipiente, se sumergió la sonda de medición dentro de dicha solución y se esperó un tiempo de dos minutos antes de realizar la primera medición, este tiempo es requerido para estabilizar la lectura, el circuito implementado para el procedimiento de calibración fue el mismo que se presentó en la Figura 10, tomando en cuenta que se empleó la sustancia de calibración pH 4.00.

– Paso 3: de igual manera para el caso de la calibración con la sustancia patrón de pH 4.00, a través de línea de comandos del monitor serial del microcontrolador, se configuró el valor de compensación de temperatura, tomando en cuenta el valor de la temperatura al momento realizar la medición en laboratorio, la cual fue de 15.4°C, al momento de realizar el procedimiento, también se ingresó el comando para calibración en el punto medio del rango de valores de pH (4.00).

Tabla C. Comandos para configuración y calibración pH 4.00

Comando	Resultado
T,15.4°C <cr>	Configuración en 15.4°C, como punto de compensación de temperatura.
Cal,low,4.00 <cr>	Dispositivo calibrado en el punto medio de calibración (sustancia pH 4.00)

Fuente: Autor e investigadores.

– Paso 4: toma de mediciones, luego de configurar el dispositivo en el punto de calibración mediante el código ingresado por la línea de comandos en monitor serial del microcontrolador, y con la sonda de medición dentro de la solución patrón de pH 4.00, se tomaron un total de 60 muestras, con un periodo de muestreo de 1 lectura por minuto, a partir de lo anterior se determinaron de forma estadística las siguientes características estáticas del instrumento:

Tabla D. Características estáticas del instrumento para calibración pH 4.00

Característica estática	Valor (pH)
Valor promedio	4,072361111
Valor máximo	4,077
Valor mínimo	4,066
Rango promedio del error	0,001458333
Error basado en el valor más alejado	0,077
Exactitud basada en la desviación estándar $\pm d$	0,072361111

Fuente: Autor e investigadores

Tercer punto de calibración: pH 10.00

- Paso 1: se enjuagó con agua la sonda de medición antes de realizar el procedimiento de calibración en el punto 10.00.
- Paso 2: luego de disponer de la solución de calibración pH 10.00 en un recipiente, se sumergió la sonda de medición dentro de dicha solución y se esperó un tiempo de dos minutos antes de realizar la primera medición, este tiempo es requerido para estabilizar la lectura, el circuito implementado para el procedimiento de calibración fue el mismo que se presentó en la figura 8, tomando en cuenta que se empleó la sustancia de calibración pH 10.00.
- Paso 3: utilizando la sustancia patrón de pH 10.00, también se configuró el valor de compensación de temperatura; para realizar la calibración del dispositivo se tomó en cuenta el valor de la temperatura al momento realizar la medición en laboratorio, la cual fue de 15.4°C; al momento de realizar el procedimiento, también se ingresó el comando para calibración en el punto medio del rango de valores de pH (10.00).

Tabla E. Comandos para configuración y calibración pH 10.00

Comando	Resultado
T,15.4°C <cr>	Configuración en 15.4°C, como punto de compensación de temperatura.
Cal,high,10.00 <cr>	Dispositivo calibrado en el punto medio de calibración (sustancia pH 10.00)

Fuente: Autor e investigadores.

- Paso 4: toma de mediciones, luego de configurar el dispositivo en el punto de calibración mediante el código ingresado por la línea de comandos en monitor serial del microcontrolador, y con la sonda de medición dentro de la solución patrón de pH 10.00, se tomaron un total de 60 muestras, con un periodo de muestreo de 1 lectura por minuto, a partir de lo anterior se determinaron de forma estadística las siguientes características estáticas del instrumento:

Tabla F. Características estáticas del instrumento para calibración pH 10.00

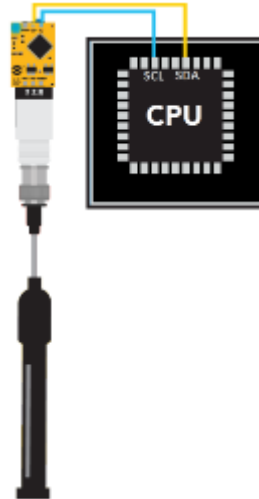
Característica estática	Valor (pH)
Valor promedio	9,93466667
Valor máximo	9,941
Valor mínimo	9,929
Rango promedio del error	0,00916667
Error basado en el valor más alejado	0,0171
Exactitud basada en la desviación estándar $\pm d$	0,01653333

Fuente: Autor e investigadores

## Anexo 2. Protocolo de calibración para el circuito D.O. EZO™

–Paso 1: se implementó el circuito presentado en la Figura 11, antes de realizar la primera adquisición de datos a través del microcontrolador, se esperó un tiempo de un minuto, con el fin de permitir que la lectura se estabilizara.

Figura A. Circuito implementado para calibración D.O. EZO™



Fuente: Autor e investigadores

Una vez concluido el tiempo de espera, requerido para estabilizar la medición se procedió a ingresar por línea de comandos las instrucciones requeridas para iniciar el procedimiento de ajuste y calibración para la lectura del valor de la conductividad eléctrica.

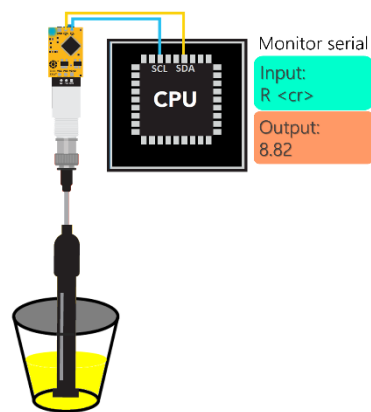
Tabla A. Comando para configuración y calibración para oxígeno disuelto

Comando	Resultado
Cal <cr>	Lectura del valor por defecto ~8.82 mg/L

Fuente: Autor e investigadores.

–Paso 2: toma de mediciones, para realizar este procedimiento se implementó el circuito presentado en la siguiente figura.

Figura B. Circuito implementado y procedimiento de calibración D.O. EZO™



Fuente: Autor e investigadores.

Luego de acondicionar la sonda dentro de la solución de calibración, se realizó el procedimiento de calibración mediante línea de comandos a través del monitor serial del microcontrolador, para esto fue necesario configurar el valor de compensación de temperatura (15.4°C al momento de realizar la medición), el valor de la presión atmosférica 102.7 kPa, y el comando de ajuste para iniciar la lectura de los valores de oxígeno disuelto en agua.

Tabla C. Comandos para configuración y calibración para oxígeno disuelto

Comando	Resultado
T,15.4°C <cr>	Configuración en 15.4°C, como punto de compensación de temperatura.
P,102.7 <cr>	Configuración en 102.7kPa, como punto de compensación de presión atmosférica.
Cal,0 <cr>	Dispositivo calibrado en el punto inicial de calibración para la toma de mediciones.

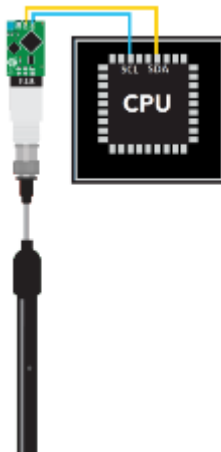
Fuente: Autor e investigadores.



### Anexo 3. Protocolo de calibración para el circuito E.C. EZO™

–Paso 1: se implementó el circuito presentado en la figura 13, antes de realizar la primera adquisición de datos a través del microcontrolador, la sonda de medición no se sumergió en algún líquido de calibración, ni se puso en contacto con algún material sólido, es decir la sonda permaneció libre durante la primera parte del proceso. La siguiente figura muestra el esquema de circuito implementado.

Figura A. Circuito implementado para calibración E.C. EZO™



Fuente: Autor e investigadores

– Paso 2: luego de implementar el circuito presentado en la figura 13, se procedió a ingresar el comando requerido para calibrar el circuito de acondicionamiento de señal E.C. EZO™ en estado “Seco”. A a continuación se presenta el comando utilizado y el resultado obtenido.

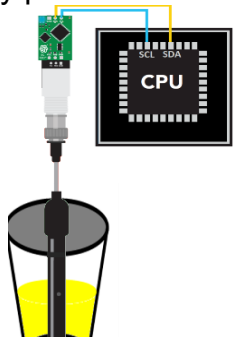
Tabla A. Comandos de calibración de conductividad eléctrica en estado seco

Comando	Resultado
Cal,dry <cr>	Lectura: 0.00 Calibración correcta en estado seco

Fuente: Autor e investigadores.

– Paso 3: una vez ajustada la calibración en seco para el circuito de acondicionamiento E.C. EZO™, se procedió a realizar la calibración según las sustancias patrón especificadas por el fabricante, según el procedimiento presentado en la Figura B.

Figura B. Circuito implementado y procedimiento de calibración E.C. EZO™



Fuente: Autor e investigadores.

La primera sustancia patrón que se utilizó, fue la correspondiente al punto de calibración bajo cuyo valor patrón corresponde a 1.413  $\mu\text{S}$ ; antes de tomar el valor de la primera lectura, se procedió a esperar un tiempo de 1 minuto, con el fin de estabilizar la lectura de la medición, luego de este tiempo se ingresó el comando de calibración y ajuste según el valor de conductividad eléctrica de la sustancia patrón; la siguiente tabla presenta el comando utilizado e ingresado por línea de comandos desde el monitor serial del microcontrolador LoPy, para configurar dicho parámetro.

Figura B. Comandos para calibración de conductividad para 1.413  $\mu\text{S}$

Comando	Resultado
Cal,1413 <cr>	Calibración correcta en punto bajo de calibración 1.413 $\mu\text{S}$

Fuente: Autor e investigadores.

- Paso 4: luego de realizar la calibración en el punto bajo 1.413  $\mu\text{S}$ , se retiró la sonda de la solución y se procedió a enjuagarla con el fin de eliminar posibles residuos de la sustancia patrón utilizada.
- Paso 5: la siguiente etapa del procedimiento de calibración consistió en ajustar las características del circuito de acondicionamiento en el punto de calibración alto, el cual corresponde al valor de conductividad eléctrica de 12,880  $\mu\text{S}$ ; en esta parte del proceso también se implementó el sistema presentado en la Figura 14, e igual que en el paso 4, también se ingresó el comando de calibración y ajuste según el valor de conductividad eléctrica de la sustancia patrón, esta vez para el valor de 12,880  $\mu\text{S}$ ; la siguiente tabla presenta el comando utilizado e ingresado por línea de comandos desde el monitor serial del microcontrolador LoPy, para ajustar la calibración en el punto alto.

Figura C. Comandos para calibración de conductividad para 12.880  $\mu\text{S}$

Comando	Resultado
Cal,12880 <cr>	Calibración correcta en punto bajo de calibración 12.880 $\mu\text{S}$

Fuente: Autor e investigadores.

## Anexo 4. Poster XXII JORNADA DE LA INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN





### Sistema IoT para el monitoreo de parámetros de calidad en la quebrada “Las Cebollas”

Julián Andrés Avendaño-León<sup>1</sup>, Diana Angarita-Lora<sup>2</sup>, Miguel Mendoza-Morero<sup>3</sup>

1. Ingeniería Electrónica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia.  
2. Ingeniería Civil, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia.  
3. Ingeniería de Sistemas y Computación, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia.  
Teléfono: 313 456 7890, Correo: GISABH  
Contacto: [gisabh@uptc.edu.co](mailto:gisabh@uptc.edu.co)

#### Resumen

La quebrada “Las Cebollas” se encuentra dentro de la zona de influencia del afluente sanitario de Páguas y mantiene su flujo tanto al acueducto del municipio de Chicorí-Colombia como a ciertas actividades agropecuarias en su trazo. La gestión de este recurso hídrico se agudiza porque se encuentra en la zona de influencia del afluente sanitario de Páguas, hecho que ha generado numerosas reclamaciones tanto al operador del mismo afluente sanitario, como a la autoridad ambiental. Los protocolos de supervisión de los parámetros de calidad del agua se realizan ajustados a la periodicidad y análisis definidos en la norma dispuesta para tal fin, lo que conlleva la complejidad del análisis por parte de laboratorios certificados y dilaciones en la obtención de los resultados. Es por ello que la investigación encuentra en el paradigma de Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés) un aliado tecnológico con el que es posible desarrollar módulos de monitoreo y transmisión de datos de ciertas variables de la calidad del agua en tiempo real, con la flexibilidad del uso de sensores certificados, empleando el esquema cloud computing.

#### Introducción

A partir de la normatividad vigente, tanto el operador del afluente sanitario, como la autoridad ambiental realizan el monitoreo de los parámetros de calidad del recurso hídrico de la quebrada “Las Cebollas” a través de muestras in situ (puntual y manual) para su posterior análisis en laboratorio, con frecuencias de 6, 12 o 24 meses [1], lo que no es suficiente para realizar un seguimiento detallado de la calidad del recurso hídrico, dados los diferentes incidentes que se suscitan sobre el afluente. Lo anterior evidencia la necesidad de contar con un sistema complementario para monitorear de forma constante las variables asociadas a la evaluación de los estándares de calidad ambiental sobre el caudal de la quebrada que circunda el afluente.

#### Metodología

La investigación se desarrolló a través de cinco etapas: (1) inspección del estado de caso, (2) análisis, (3) diseño, (4) implementación y pruebas y (5) documentación. Para el desarrollo del prototipo se usó un método de muestreo basado en la calibración y puesta en operación de sensores para monitorear los parámetros de calidad en el caudal de la quebrada “Las Cebollas”. El prototipo se diseñó a partir del paradigma IoT para ejecutar tareas de monitoreo, reporte y programación de labores de control de los parámetros de calidad del recurso hídrico objeto de estudio.

#### Resultados

- Caracterización del entorno identificando los puntos de monitoreo A, B y C, posteriormente se identificaron variables susceptibles de medición en campo: pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto.
- Desarrollo del protocolo de muestreo según la Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas, publicada por el IDEAM [2] para dar cumplimiento a los requisitos determinados en el Decreto 3100 de Octubre de 2003 y al manual de procedimiento *Estados/ Métodos*.
- Desarrollo de una solución para el monitoreo de las variables establecidas, para que la autoridad ambiental y al operador de afluente sanitario promuevan acciones positivas en favor del afluente, su entorno y los pobladores, a fin de mitigar los posibles impactos negativos del afluente sanitario sobre la quebrada.



Fig. 2. Ilustraciones de monitoreo en terreno

#### Conclusiones

El prototipo desarrollado ha permitido realizar el monitoreo de las variables pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto en el agua en tres puntos de referencia respecto al trazo de la quebrada “Las Cebollas”.

Se identificó, con el desarrollo, un posible indicador de presencia de agentes contaminantes en el recurso hídrico objeto de estudio, en el punto de monitoreo correspondiente a la estación B, debido a que en promedio se encontró un valor de pH de 5.59, el cual se encuentra fuera del rango permitido para esta variable según la normatividad vigente [3], y un valor de conductividad eléctrica entre 526.67 µS/cm y 789.55 µS/cm.

La autoridad ambiental podría implementar un programa de muestreo mixto que tome en cuenta los dos tipos de muestreo: manual y automático, para corresponder con la totalidad de procedimientos indicados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales en la Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas.



#### Bibliografía

[1] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, República de Colombia, Decreto 858 de 2003, Bogotá, D.C., 23 de marzo de 2003.  
[2] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas, Bogotá, D.C.: IDEAM, 2004.  
[3] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Ministerio de la Protección Social, República de Colombia, Resolución 2715, Bogotá, D.C., 22 de junio de 2007.



Fig. 1. Esquema de las estaciones de monitoreo

## Anexo 5. Certificado XXII JORNADA DE LA INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN

 <b>Uptc</b> Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia	<b>ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD</b> M I S T I V A M E N T E EVALUACIÓN INSTITUCIONAL DE CALIDAD
<b>JULIAN AVENDAÑO</b>	
NIT UPTC: 891800330-1	
El Director del Centro de Gestión de Investigación y Extensión de la Facultad de Ingeniería	
CEDEC	
HACE CONSTAR QUE:	
JULIAN ANDRES AVENDAÑO LEON	
C.C. 7184880	
Participó en la modalidad de ponente, en el SEGUNDO SEMINARIO DE ACTUALIZACION FACULTAD DE INGENIERIA 2018, módulo: "Prospectiva de la comunicación de la Facultad de Ingeniería", mediante la modalidad de comunicación en póster, realizado el 5 de octubre de 2018.	
En constancia de lo anterior, se firma en Tunja el 26 de noviembre de 2018.	
	
OSCAR JAVIER GUTIERREZ JUNCO	
Director CEDEC	
<a href="mailto:cedec@uptc.edu.co">cedec@uptc.edu.co</a>	
Imis	CER08718

---

 **INVESTIGACIÓN**  
CONOCIMIENTO DE PAZ

[www.uptc.edu.co](http://www.uptc.edu.co)

Avenida Central del Norte 39 - 115  
PBX (57) 8 740 5626 Tunja - Boyacá

## Anexo 6. Certificado SIGMAH 2018



Tunja, 25 de octubre de 20178

A quien pueda interesar:

Yo, Helver Parra Arias identificado con cédula de ciudadanía 7.173.988 de Tunja, informo que **DIANA LISETH ANGARITA LOZANO, MIGUEL ANGEL MENDOZA MORENO Y JULIÁN ANDRÉS AVENDAÑO LEÓN** participaron como **PONENTES** con el tema: **SISTEMA IoT PARA EL MONITOREO Y REPORTE DE PARÁMETROS DE CALIDAD EN FUENTES HÍDRICAS, COMO APOYO A LOS PROTOCOLOS DE GESTIÓN AMBIENTAL**, en el VI Seminario Internacional y VII Nacional de Geomática, Medio Ambiente e Hidráulica realizado los días 24 y 25 de octubre de 2018, en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Se firma a los 25 días del mes de octubre de 2018 en la ciudad de Tunja.

**ING. HELVER PARRA ARIAS**

C.C. 7.173.988

Director Escuela Ingeniería Ambiental


Coordinador General VI Seminario Internacional y VII Nacional de Geomática,  
Medio Ambiente e Hidráulica - SIGMAH 2018



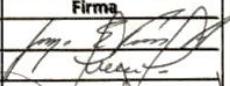
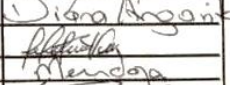
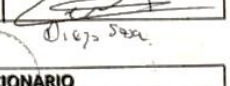
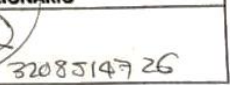



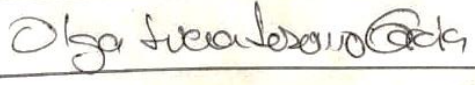

## Anexo 7. Soportes de socialización "ServiTunja S.A. E.S.P." y "Corpoboyacá"

La socialización del proyecto se desarrollo el dia lunes 18 de febrero de 2019, en las instalaciones de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá "Corpoboyacá"; ubicada en la ciudad de Tunja, y conto con la asistencia de personal administrativo y directivo de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá "Corpoboyacá" y del operador del Relleno Sanitario de Pírgua "ServiTunja S.A. E.S.P."

### a. Formato para informe de gestión comunitaria

	<b>FORMATO PARA INFORME DE GESTIÓN COMUNITARIA</b>		CODIGO	SY-RC-FQ-001
			VERSION	0
			FECHA	19-02-2016
COMUNA: <u>NORTE</u>		FECHA: <u>18/02/2019</u>		
Barrio: <u>CORPOBOYACA</u>		Dirección: <u>AV. NORTE V.A. RIPS</u>		
Medio de Ejecución: Act. Lúdica <input type="checkbox"/> Charla <input type="checkbox"/> Evento <input type="checkbox"/> Jornada de aseo <input type="checkbox"/> Medio impreso <input type="checkbox"/> Perifoneo <input type="checkbox"/> Taller <input type="checkbox"/> Reunión <input checked="" type="checkbox"/> Visita <input type="checkbox"/>				
Programado: SI <input type="checkbox"/> NO <input checked="" type="checkbox"/> Hora programada: <u>2:00</u> Hora Ejecutada: Hora Fin:				
OBJETIVO Y DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD: <u>Reunión para presentación por parte de UPTC Ing. Angarita y Grupo de Investigación. Parámetros de calidad de agua en la Quebrada de Caballo.</u>				

<b>COMPROMISOS SERVIGENERALES:</b> <u>Se hace llevar presentación y formulario para su respectivo trámite.</u>
---

Número de Asistentes:		Se anexa lista de asistencia SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>		
Nombre y Apellido	Dirección	Entidad	Teléfono	Firma
Jorge Eduardo Rivas	Ant. Vía Rips	Corpoboyacá	3133443823	
Jorge H. González		Servitunja	3208091789	
Diana Angarita	UPTC Tunja	UPTC	3202355988	
Julian Andres Avendaño	UPTC Tunja	UPTC Tunja	3186788622	
Miguel A. Mordeano	UPTC Tunja	UPTC Tunja	3208082556	
Christian Leonardo C.	UPTC Tunja	UPTC Tunja	3212975812	
Diego Sosa S.	UPTC Tunja	UPTC Tunja	3133476690	
NOMBRE FUNCIONARIO		FIRMA FUNCIONARIO		
		 3208314726		

b. Registro fotográfico



Equipo de trabajo  
TELEMATICS – GISABA



Equipo de trabajo  
TELEMATICS – GISABA, personal Corpoboyacá y  
ServiTunja



Socialización del trabajo realizado



Socialización del trabajo realizado